

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Desarrollo del modelo cinemático y dinámico de un simulador de carreteras



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

ENEKO SORIA PICÓN

Aitor Plaza Puértolas

Pamplona, 27/01/2020



## Índice

1. OBJETIVO .....	1
2. ANTECEDENTES .....	1
3. SIMULADOR DE CARRETERAS .....	1
3.1. MTS 329.....	1
4. CARACTERÍSTICAS.....	2
4.1. Movimiento .....	2
4.1.1. Dirección.....	2
4.1.2. Caída.....	3
4.1.3. Movimiento vertical.....	5
4.1.4. Frenada .....	5
4.1.5. Movimiento longitudinal.....	6
4.2. Capacidades de carga y velocidades máximas .....	7
5. TIPO DE UNIONES.....	9
5.1. Revolute Joint .....	9
5.2. Translational Joint.....	10
5.3. Spherical Joint .....	10
5.4. Universal Joint .....	11
5.5. Fixed Joint .....	11
5.6. Bushings.....	11
6. MODELO CAD .....	12
6.1. Reenvíos .....	12
6.2. Barras o struts.....	14
6.3. Swift .....	16
7. MODELO EN ADAMS .....	17
8. VERIFICACIÓN GEOMÉTRICA.....	20
8.1. Planteamiento .....	20
8.2. Tratamiento de los datos .....	20
8.3. Medición de las respuestas .....	21
8.4. Resultados.....	21
8.4.1. Desplazamiento longitudinal .....	22
8.4.2. Desplazamiento lateral .....	25
8.4.3. Desplazamiento vertical .....	27
9. VERIFICACIÓN DINÁMICA: PRIMERA ADQUISICIÓN .....	28
9.1. Planteamiento .....	28
9.2. Primera adquisición .....	30
9.3. Análisis de los resultados .....	30



9.4.	Modelo de 2 bushings: Primera iteración .....	33
9.4.1.	Longitudinal .....	33
9.4.2.	Lateral 1 .....	35
9.4.3.	Lateral 2 .....	35
9.4.4.	Brake.....	36
9.5.	Modelo de 2 bushings: Segunda iteración.....	37
9.6.	Modelo de 2 bushings: tercera iteración .....	39
9.7.	Modelo de 6 bushings: cuarta iteración.....	42
9.7.1.	Ajuste de la medición longitudinal .....	42
9.7.2.	Ajuste de la medición del lateral 1 y 3 .....	45
9.7.3.	Ajuste de la medición del lateral 2.....	48
9.7.4.	Ajuste de la medición de brake .....	49
9.8.	Conclusión.....	51
10.	VERIFICACIÓN DINÁMICA: SEGUNDA ADQUISICIÓN .....	51
10.1.	Análisis resultados .....	52
10.1.1.	Longitudinal .....	52
10.1.2.	Lateral 1 .....	53
10.1.3.	Lateral 2 .....	55
10.1.4.	Lateral 3 .....	56
10.1.5.	Brake.....	57
10.2.	Comparación de las adquisiciones .....	58
10.2.1.	Comparación de la adquisición longitudinal .....	58
10.2.2.	Comparación de la adquisición lateral 1.....	59
10.2.3.	Comparación de la adquisición lateral 2.....	60
10.2.4.	Comparación de la adquisición lateral 3.....	61
10.2.5.	Comparación de la adquisición brake .....	62
10.2.6.	Comparación de la adquisición vertical .....	62
10.2.7.	Conclusión .....	63
10.3.	Ajuste del modelo .....	64
10.3.1.	Planteamiento.....	64
10.3.2.	Calibración del modelo.....	64
10.3.3.	Lateral 1 y Lateral 3 .....	64
10.3.4.	Lateral 2 .....	67
10.3.5.	Longitudinal .....	68
10.3.6.	Brake.....	70
11.	Comprobación geométrica.....	71
11.1.	Desplazamiento longitudinal.....	71



11.2.	Desplazamiento lateral. ....	72
11.3.	Desplazamiento vertical.....	73
12.	CONCLUSIÓN.....	74
13.	BIBLIOGRAFÍA .....	74





Ilustración 1 Cambio de la dirección, FUENTE: ADAMS .....	2
Ilustración 2 Ángulos de caída, FUENTE: Aficionadosalamecanica.....	3
Ilustración 3 Presión en las ruedas trazando una curva, FUENTE: Oponeo .....	4
Ilustración 4 Cambio del ángulo de caída, FUENTE: ADAMS.....	4
Ilustración 5 Desplazamiento vertical, FUENTE: ADAMS .....	5
Ilustración 6 Momento de frenada, FUENTE: Google imagenes.....	6
Ilustración 7 Simulación del momento de frenada, FUENTE: ADAMS.....	6
Ilustración 8 Desplazamiento longitudinal, FUENTE: ADAMS .....	7
Ilustración 9 Revolute Joint, FUENTE: ADAMS .....	10
Ilustración 10 Translational Joint, FUENTE: ADAMS .....	10
Ilustración 11 Spherical Joint, FUENTE: ADAMS .....	11
Ilustración 12 Universal Joint, FUENTE: ADAMS .....	11
Ilustración 13 Reenvío longitudinal, lateral 1, lateral 2 y lateral 3, FUENTE: SOLIDWORKS .....	13
Ilustración 14 Reenvío vertical, FUENTE: SOLIDWORKS.....	13
Ilustración 15 Reenvío brake, FUENTE: SOLIDWORKS .....	14
Ilustración 16 Reenvío central, FUENTE: SOLIDWORKS.....	14
Ilustración 17 Barra o struts laterales, FUENTE: SOLIDWORKS .....	15
Ilustración 18 Barra o strut longitudinal, FUENTE: SOLIDWORKS .....	15
Ilustración 19 Barra o strut central, FUENTE: SOLIDWORKS .....	15
Ilustración 20 Barra o strut vertical, FUENTE: SOLIDWORKS .....	15
Ilustración 21 Swift, FUENTE: SOLIDWORKS.....	16
Ilustración 22 Modelo CAD del simulador, FUENTE: SOLIDWORKS .....	16
Ilustración 23 Conjunto de puntos del modelo, FUENTE: ADAMS.....	17
Ilustración 24 Conjunto de puntos y piezas del modelo, FUENTE: ADAMS .....	18
Ilustración 25 Conjunto de puntos, piezas y uniones del modelo, FUENTE: ADAMS	18
Ilustración 26 Unión de la barra central con las barras verticales por medio de bushings, FUENTE: ADAMS.....	19
Ilustración 27 Unión de la barra central con las barras verticales por medio de rotulas, FUENTE: ADAMS .....	19
Ilustración 28 Desplazamiento del actuador vertical, FUENTE: ADAMS.....	21
Ilustración 29 Verificación geométrica, desplazamiento longitudinal, FUENTE: RPC .....	22
Ilustración 30 Proceso de iteración del valor de la rigidez, FUENTE: RPC .....	23
Ilustración 31 Desfase entre la barra central y las barras verticales, FUENTE: ADAMS .....	23
Ilustración 32 Posición inicial de los actuadores, FUENTE: RPC.....	24
Ilustración 33 Verificación geométrica, desplazamiento lateral, FUENTE: RPC .....	26
Ilustración 34 Verificación geométrica, desplazamiento vertical, FUENTE, RPC.....	27
Ilustración 35 Parámetros de los bushings, FUENTE: ADAMS.....	29
Ilustración 36 Representación del bushing en ADAMS junto con direcciones generales del modelo, FUENTE: ADAMS .....	29
Ilustración 37 Modificación de la zona del reenvío brake, FUENTE: ADAMS .....	30
Ilustración 38 Primera comparación de las fuerzas longitudinales, FUENTE: RPC ..	31
Ilustración 39 Primera comparación de las fuerzas laterales 1, FUENTE: RPC.....	31
Ilustración 40 Primera comparación de las fuerzas laterales 2, FUENTE: RPC.....	32
Ilustración 41 Primera comparación de las fuerzas de brake, FUENTE: RPC .....	32
Ilustración 42 Comparación de las amplitudes de las fuerzas longitudinales en la primera iteración, FUENTE: RPC .....	33



Ilustración 43 Comparación del desfase de las fuerzas longitudinales en la primera iteración, FUENTE: RPC .....	34
Ilustración 44 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas laterales 1 en la primera iteración, FUENTE: RPC .....	35
Ilustración 45 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas laterales 2 en la primera iteración, FUENTE: RPC .....	36
Ilustración 46 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas de brake en la primera iteración, FUENTE: RPC .....	36
Ilustración 47 Introducción de un contacto en el reenvío de brake, FUENTE: ADAMS .....	38
Ilustración 48 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas de brake en la segunda iteración, FUENTE: RPC .....	38
Ilustración 49 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas laterales 1 en la tercera iteración, FUENTE: RPC .....	40
Ilustración 50 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas laterales 2 en la tercera iteración, FUENTE: RPC .....	40
Ilustración 51 Resultados de la tercera opción en la medición de fuerzas laterales 1, FUENTE: RPC .....	41
Ilustración 52 Nuevo modelo con 6 bushings, FUENTE: ADAMS .....	42
Ilustración 53 Posición de los nuevos bushings, FUENTE: ADAMS .....	42
Ilustración 54 Bushings laterales modificados con las coordenadas generales, FUENTE: ADAMS .....	43
Ilustración 55 Bushing longitudinal modificado con las coordenadas generales, FUENTE: ADAMS .....	43
Ilustración 56 Comprobación de las amplitudes de las fuerzas longitudinales en la cuarta iteración, FUENTE: RPC .....	44
Ilustración 57 Comprobación del desfase de las fuerzas longitudinales en la cuarta iteración, FUENTE: RPC .....	44
Ilustración 58 Comprobación del desfase y de las amplitudes de las fuerzas laterales 1 en la cuarta iteración, FUENTE: RPC .....	46
Ilustración 59 Comprobación del desfase y de las amplitudes de las fuerzas laterales 3 en la cuarta iteración, FUENTE: RPC .....	47
Ilustración 60 Comprobación de las amplitudes de las fuerzas laterales 2 en la cuarta iteración, FUENTE: RPC .....	48
Ilustración 61 Comprobación del desfase de las fuerzas laterales 2 en la cuarta iteración, FUENTE: RPC .....	48
Ilustración 62 Comprobación de las amplitudes de las fuerzas de brake en la cuarta iteración, FUENTE: RPC .....	50
Ilustración 63 Comprobación del desfase de las fuerzas de brake en la cuarta iteración, FUENTE: RPC .....	50
Ilustración 64 Comparación de las amplitudes de las fuerzas longitudinales en la segunda adquisición, FUENTE: RPC .....	52
Ilustración 65 Comparación del desfase de las fuerzas longitudinales en la segunda adquisición, FUENTE: RPC .....	53
Ilustración 66 Comparación de las amplitudes y de la forma de las fuerzas laterales 1 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC .....	54
Ilustración 67 Comparación de las amplitudes de las fuerzas laterales 2 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC .....	55
Ilustración 68 Comparación del desfase de las fuerzas laterales 2 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC .....	55



Ilustración 69 Comparación de las amplitudes y de la forma de las fuerzas laterales 3 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	56
Ilustración 70 Comparación de las amplitudes de las fuerzas de brake en la segunda adquisición, FUENTE: RPC .....	57
Ilustración 71 Comparación del desfase de las fuerzas de brake en la segunda adquisición, FUENTE: RPC .....	57
Ilustración 72 Entrada del actuador longitudinal en la segunda adquisición, FUENTE: RPC .....	58
Ilustración 73 Entrada del actuador longitudinal en la primera adquisición, FUENTE: RPC.....	58
Ilustración 74 Entrada del actuador lateral 1 en la primera adquisición, FUENTE: RPC.....	59
Ilustración 75 Entrada del actuador lateral 1 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	59
Ilustración 76 Entrada del actuador lateral 2 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	60
Ilustración 77 Entrada del actuador lateral 2 en la primera adquisición, FUENTE: RPC.....	60
Ilustración 78 Entrada del actuador lateral 3 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	61
Ilustración 79 Entrada del actuador lateral 3 en la primera adquisición, FUENTE: RPC.....	61
Ilustración 80 Entrada del actuador de brake en la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	62
Ilustración 81 Entrada del actuador de brake en la primera adquisición, FUENTE: RPC.....	62
Ilustración 82 Entrada del actuador vertical en la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	63
Ilustración 83 Entrada del actuador vertical en la primera adquisición, FUENTE: RPC .....	63
Ilustración 84 Comparación de las amplitudes de las fuerzas laterales 1 en la primera iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC .....	65
Ilustración 85 Comparación del desfase de las fuerzas laterales 1 en la primera iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	65
Ilustración 86 Comparación de las amplitudes de las fuerzas laterales 3 en la segunda iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC .....	66
Ilustración 87 Comparación del desfase de las fuerzas laterales 3 en la segunda iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	66
Ilustración 88 Comparación de las amplitudes de las fuerzas laterales 2 en la tercera iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	67
Ilustración 89 Comparación del desfase de las fuerzas laterales 2 en la tercera iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	68
Ilustración 90 Comparación de las amplitudes de las fuerzas longitudinales en la cuarta iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC .....	69
Ilustración 91 Comparación del desfase de las fuerzas longitudinales en la cuarta iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	69
Ilustración 92 Comparación de las amplitudes de las fuerzas de brake en la quinta iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	70
Ilustración 93 Comparación del desfase de las fuerzas de brake en la quinta iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC.....	70



Ilustración 94 Verificación de los desplazamientos longitudinales del Swift en la segunda adquisición, FUENTE: RPC..... 72

Ilustración 95 Verificación de los desplazamientos laterales del Swift en la segunda adquisición, FUENTE: RPC ..... 73

Ilustración 96 Verificación de los desplazamientos verticales del Swift en la segunda adquisición, FUENTE: RPC ..... 73





## 1. OBJETIVO

Los objetivos que se han establecido en este proyecto son los siguientes:

- Verificación y actualización del modelo CAD de uno de los dos simuladores de carreteras de 6 g.d.l del centro NAITEC.
- Desarrollo de un modelo cinemático y dinámico de 6 g.d.l de uno de los dos simuladores de carreteras mediante el software MSC ADAMS.

## 2. ANTECEDENTES

Este proyecto se ha desarrollado durante las prácticas realizadas en el centro tecnológico NAITEC, concretamente en el edificio situado en Pamplona, en el cual uno de los servicios que se realiza es la simulación de componentes de automoción empleado para ello dos simuladores de carreteras, de 6 g.d.l cada uno, colocados uno enfrente del otro.

## 3. SIMULADOR DE CARRETERAS

En este punto se analizará a fondo el simulador de carretera que se va a modelar con el fin de conocer su funcionamiento y los distintos componentes que lo forman. Para ello, por un lado, se analiza el número de movimientos que puede hacer el simulador y por ende el número de movimientos que podrá realizar el modelo. Por otro lado, la ejecución de los distintos movimientos del simulador y su importancia durante la conducción. Por último, las limitaciones de carga máxima y velocidad máxima del simulador, ya que, esto se tiene que tener en cuenta al ser también las limitaciones del modelo a desarrollar.

### 3.1.MTS 329

La empresa MTS nació en 1966 orientada a sistemas de pruebas de materiales, evoluciono para convertirse en uno de los proveedores líderes mundiales de sistemas de prueba de alto rendimiento y sensores de medición de posición. Ofreciendo una gran gama de simuladores y sensores capaz de adaptarse a casi cualquier vehículo, material, estructura o máquina.

De esta empresa son los simuladores de carreteras que dispone NAITEC, concretamente dispone de dos modelos MTS 329 6DOF. Cada modelo dispone de 6 grados de libertad, que permite simular los movimientos que se producen en las ruedas de un vehículo durante su desplazamiento. También dispone de diferentes configuraciones para adaptarse al componente que se quiera testear.

## 4. CARACTERÍSTICAS

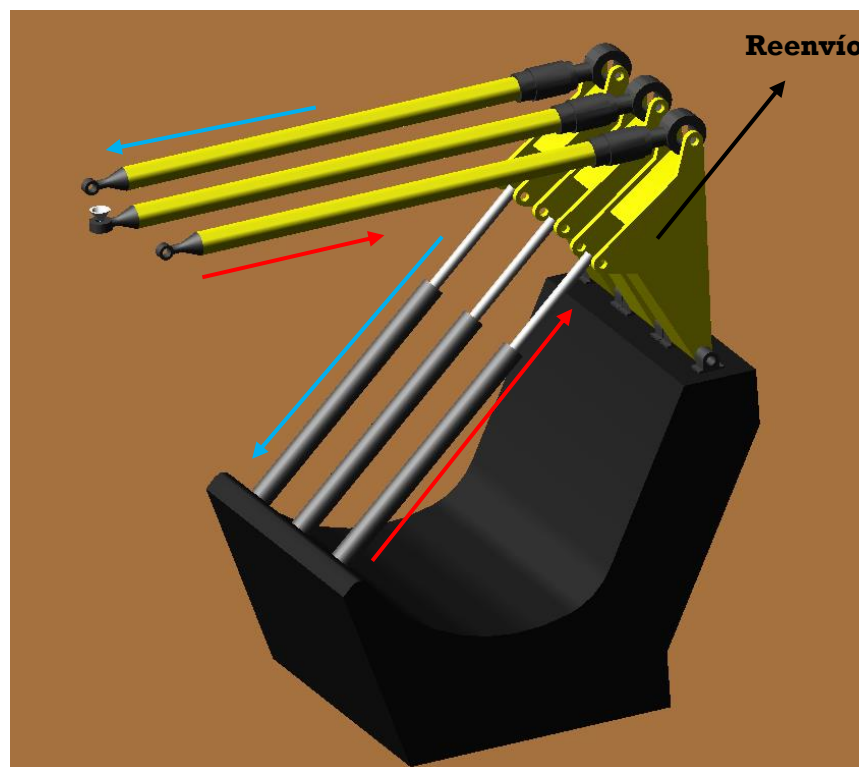
### 4.1. Movimiento

Como ya se ha mencionado anteriormente, cada simulador MTS 329 dispone de 6 grados de libertad. Por medio de estos, el simulador es capaz de realizar los movimientos de dirección, de frenada, de caída de la rueda, desplazamientos verticales y desplazamiento longitudinal. Para ello, el simulador dispone de distintos actuadores cuyos desplazamientos consiguen imitar el comportamiento de la rueda del vehículo durante su conducción.

#### 4.1.1. Dirección

El cambio de dirección es una de las acciones más importantes que realizan las ruedas, al posibilitar al vehículo inscribir una curva o impedir que este se salga de la calzada. Por lo cual, es de vital importancia conocer el comportamiento del vehículo y de sus componentes ante la variación de la dirección.

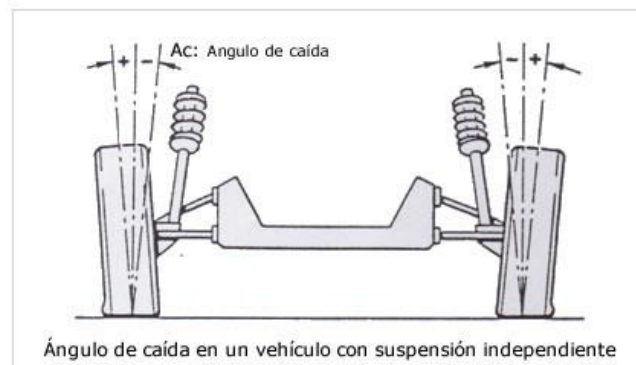
Para simular el cambio de dirección que se da en el vehículo se utilizan dos actuadores conectados a reenvíos, consultar ilustración 1, al desplazar los actuadores rota los reenvíos y estos desplazan las barras conectadas a los extremos del Swift, componente que hace las funciones de la rueda. Generalmente, los actuadores realizan desplazamientos opuestos, de manera que, el giro del Swift se realiza utilizando los dos actuadores laterales.



*Ilustración 1 Cambio de la dirección, FUENTE: ADAMS*

#### 4.1.2. Caída

El ángulo de caída es el ángulo formado entre la prolongación del eje de simetría con el vertical que pasa por el centro de apoyo de la rueda. Se diferencia entre ángulos de caída positivos y negativos. Cuando la parte superior de la rueda es la que está más separada del eje vertical se considera que se tiene una caída positiva. En caso contrario, si la parte de debajo de la rueda es la que más separa del eje vertical se considera que se tiene una caída negativa. Cada una de ellas mejora diferentes aspectos del vehículo.



*Ilustración 2 Ángulos de caída, FUENTE: Aficionadosalamecanica*

Durante la inscripción de una curva las fuerzas centrífugas que se generan varían la presión de los neumáticos, aumentando la presión en la parte exterior y disminuyendo en la parte interior. Esto genera una deformación en el neumático que tiene como consecuencia una pérdida de adherencia al tener menos superficie en contacto y un desgaste desigual en el neumático que reduce su vida útil del neumático.

Para reducir este efecto en la rueda exterior, con respecto al interior de la curva, se conseguiría dándole una caída negativa lo que generaría una diferencia de presión que compensaría la generada por las fuerzas centrífugas. Sin embargo, para reducir este efecto en la rueda interior, necesitaría tener una caída positiva.

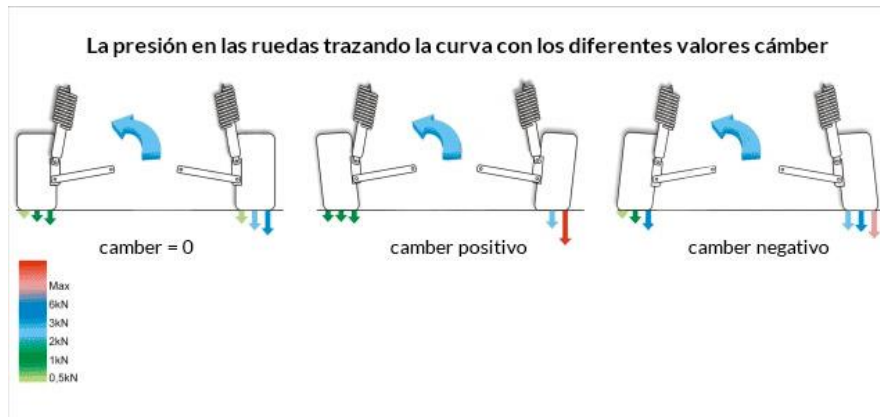


Ilustración 3 Presión en las ruedas trazando una curva, FUENTE: Oponeo

También hay que tener en cuenta, que la deformación sufrida por los neumáticos genera variaciones en la caída, por lo tanto, esta no se mantiene constante y varía su valor durante la conducción. Para poder simular estas variaciones, el simulador dispone de un único actuador cuyo desplazamiento rota el reenvío lateral 2, consultar ilustración 4, al que está conectado y a su vez este desplaza la barra articulada por medio de una rótula conectada a la parte inferior del Swift.

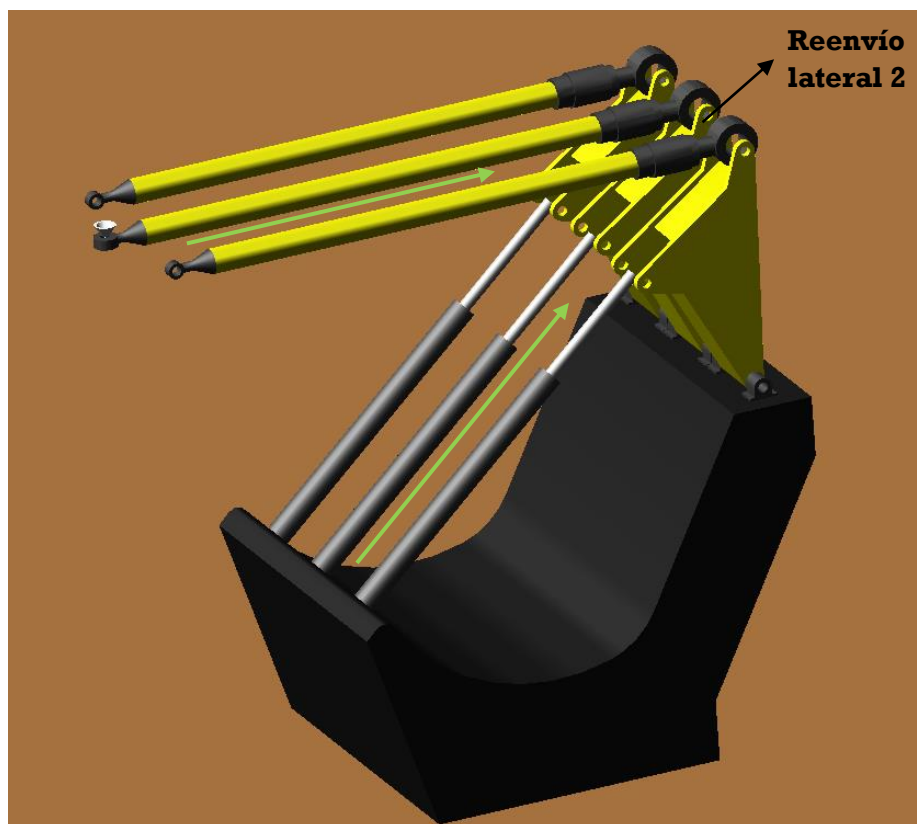
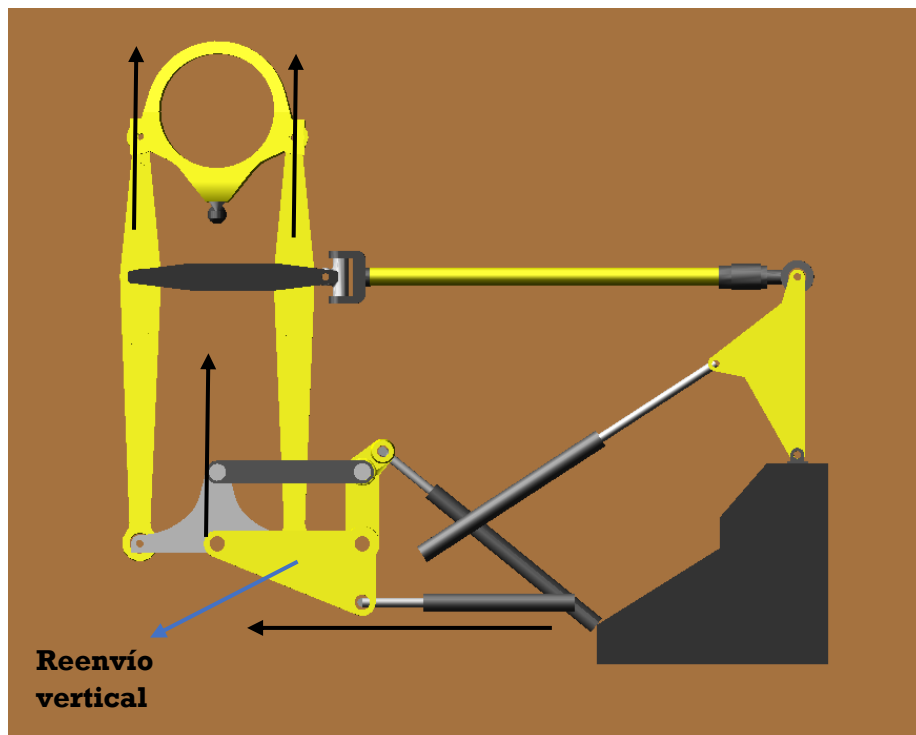


Ilustración 4 Cambio del ángulo de caída, FUENTE: ADAMS

#### 4.1.3. Movimiento vertical

Durante la conducción los neumáticos experimentan desplazamientos verticales debido a irregularidades de la calzada o una transferencia de peso. Estos desplazamientos afectan a la adherencia del vehículo y por lo tanto al control del conductor sobre este, ya que, debido a esto los neumáticos pueden perder el contacto con la calzada. Por otro lado, estos desplazamientos se transmiten al resto del vehículo afectando a la comodidad de los pasajeros. Por ello, la suspensión del vehículo debe absorber estas variaciones de manera eficiente manteniendo un equilibrio entre la pérdida de adherencia y la comodidad del conductor.

Para poder simular estos desplazamientos, el simulador dispone de un único actuador en posición horizontal cercano al suelo. Este actuador está conectado a un reenvío vertical, consultar ilustración 5, el cual rota elevando las dos barras verticales conectadas al Swift por medio de rótulas.



*Ilustración 5 Desplazamiento vertical, FUENTE: ADAMS*

#### 4.1.4. Frenada

Otra de las acciones más importantes que debe poder realizar un vehículo es la de frenada. Durante esta acción el vehículo debe reducir su velocidad sin entrar en la zona de deslizamiento, ya que, esto haría perder el control del conductor sobre el vehículo. Para reducir la velocidad o detener el vehículo se les aplica a las ruedas un momento que genera una desaceleración.

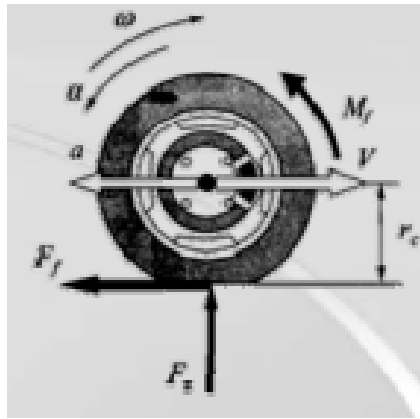


Ilustración 6 Momento de frenada, FUENTE: Google imagenes

Para poder simular ese giro producido por el momento de frenada, el simulador dispone de un único actuador cuyo desplazamiento rota un reenvío central, consultar ilustración 7, el cual eleva una de las barras verticales conectadas al Swift mientras que baja la otra. De esta manera reproduce el momento de frenado.

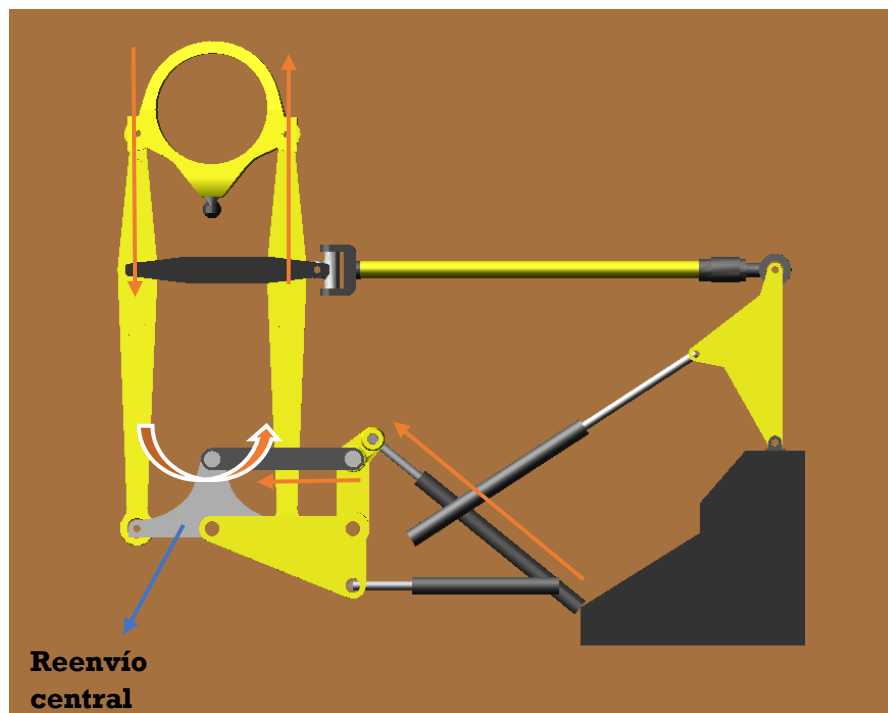


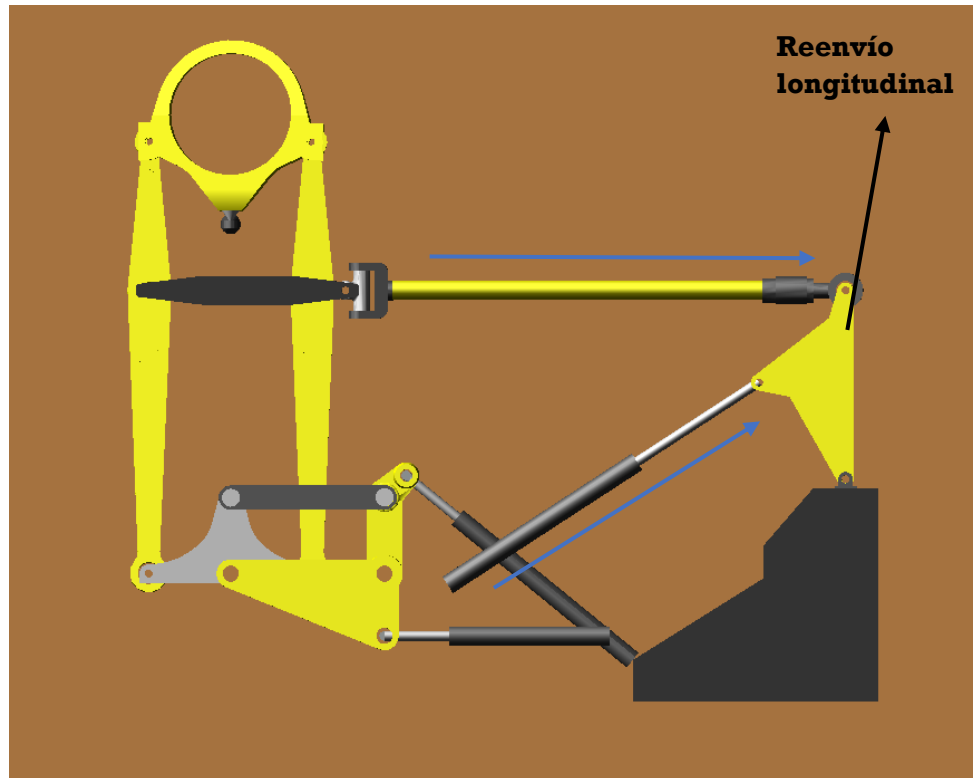
Ilustración 7 Simulación del momento de frenada, FUENTE: ADAMS

#### 4.1.5. Movimiento longitudinal

Durante la conducción se puede llegar a dar un desplazamiento longitudinal relativo de las ruedas respecto la carrocería y los demás componentes del vehículo. Este desplazamiento puede darse en un frenado brusco o en una aceleración repentina, en ambos casos debido a la inercia del vehículo puede darse ese

desplazamiento relativo. Por lo tanto, los sistemas y componentes del vehículo deberán ser capaces de soportar estos desplazamientos.

Para simular estos desplazamientos, el simulador dispone de un único actuador cuyo desplazamiento produce una rotación al reenvío longitudinal, consultar ilustración 8, al cual está conectado y este a su vez desplaza una barra que por medio de una junta universal tira de las dos barras verticales conectadas al Swift.



*Ilustración 8 Desplazamiento longitudinal, FUENTE: ADAMS*

#### 4.2. Capacidades de carga y velocidades máximas

Una vez se conoce los distintos movimientos que puede realizar el simulador y cómo los lleva a cabo, el siguiente paso consiste en obtener la capacidad de carga máxima que puede alcanzar el simulador en cada movimiento, así como con qué velocidad máxima puede realizar dichos movimientos. Conocer estos datos es una parte importante del proyecto, ya que, se tiene que tener en cuenta las limitaciones del simulador durante el desarrollo y manejo del modelo.

Lo primero que se hizo fue la obtención de los números de serie tanto de los actuadores como de las servoválvulas. Para ello, se recurre al catálogo facilitado en por la empresa fabricante del simulador y se comprueba si los números de serie de los componentes coinciden con los del catálogo, sin embargo, al ser una versión más antigua los números de serie no coincidían. Por lo tanto, se recurre a los encargados de mantenimiento de la máquina y con los datos facilitados de caudales y áreas de

los pistones se calculan las capacidades de carga y velocidad de cada actuador y en consecuencia de cada movimiento del simulador.

- Dirección

Servo Válvula (X2)	Caudal	Max presión de operación
	Litros/min	MPa
252.25G	57	31

Actuador	Fuerza	Carrera Dinámica	Área efectiva	Velocidad Max
	kN	mm	cm <sup>2</sup>	m/s
244.11S	15	177,8	7.5	2.53

- Caída

Servo Válvula (X2)	Caudal	Max presión de operación
	Litros/min	MPa
252.25G	57	31

Actuador	Fuerza	Carrera Dinámica	Área efectiva	Velocidad Max
	kN	mm	cm <sup>2</sup>	m/s
244.20S	31	177,8	15,48	1.2274

- Vertical

Servo Válvula (X1)	Caudal	Max presión de operación
	Litros/min	MPa
256.25	950	21

Actuador	Fuerza	Carrera Dinámica	Área efectiva	Velocidad Max
	kN	mm	cm <sup>2</sup>	m/s
244.23S	160	152.4	82.1	1.9285



- Frenada

Servo Válvula (X2)	Caudal	Max presión de operación
	Litros/min	MPa
252.25G	57	31

Actuador	Fuerza	Carrera Dinámica	Área efectiva	Velocidad Max
	kN	mm	cm <sup>2</sup>	m/s
244.23S	160	152.4	82.1	1.9285

- Longitudinal

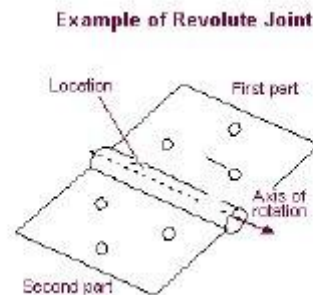
Servo Válvula (X2)	Caudal	Max presión de operación
	Litros/min	MPa
252.25G	57	31

Actuador	Fuerza	Carrera Dinámica	Área efectiva	Velocidad Max
	kN	mm	cm <sup>2</sup>	m/s
244.21S	50	177,8	25,16	0.7552

## 5. TIPO DE UNIONES

### 5.1.Revolute Joint

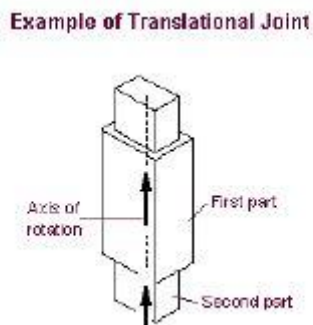
Se trata de una junta que permite unir componentes mediante una unión móvil de un grado de libertad, la cual permite la rotación sobre un eje de un grado de libertad. Esta unión se utilizará principalmente para modelar las uniones entre los reenvíos. En el programa ADAMS se representa de la siguiente forma.



*Ilustración 9 Revolute Joint, FUENTE: ADAMS*

## 5.2. Translational Joint

Se trata de una articulación prismática que permite unir componentes por medio de una unión móvil de un grado de libertad, la cual permite el desplazamiento lineal de entre componentes. Esta unión se utilizará principalmente para modelizar los diferentes actuadores y al mismo tiempo servirán como puntos de introducción de los inputs. En el programa ADAMS se representa de la siguiente forma.



*Ilustración 10 Translational Joint, FUENTE: ADAMS*

## 5.3. Spherical Joint

La siguiente unión empleada se trata de las articulaciones esféricas que permiten la unión de dos componentes por medio de una unión con 3 grados de libertad, la cual permite la rotación en tres ejes entre los componentes. Esta unión se utilizará principalmente entre las barras que transmiten directamente movimiento al

Swift y en las uniones de entre las distintas barras y los reenvíos. Esta unión se representa en el programa con la siguiente forma.

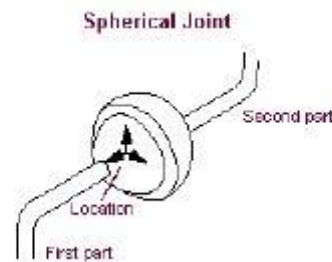


Ilustración 11 Spherical Joint, FUENTE: ADAMS

#### 5.4. Universal Joint

Una de las uniones más importantes es la unión entre la barra que transmite los desplazamientos longitudinales al Swift y las barras que transmiten los desplazamientos verticales y los momentos de frenada al Swift, ya que, esta unión debe permitir las inclinaciones relativas entre las dos barras verticales cuando se simula un cambio de dirección. Para ello, se emplea una junta universal, de dos grados de libertad, en esta unión. Esta junta se representa de la siguiente forma en ADAMS.

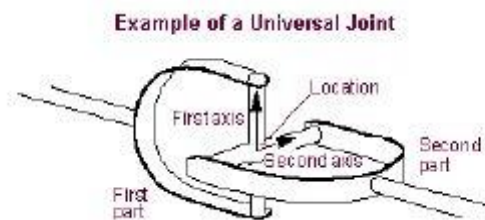


Ilustración 12 Universal Joint, FUENTE: ADAMS

#### 5.5. Fixed Joint

Otra de las uniones importantes empleadas fueron las uniones rígidas, las cuales permiten unir rigidamente dos componentes. Aunque en un principio no se pensó en utilizarse, ya que, se iba a trabajar con geometrías simples a las que se les otorgaría la masa y las inercias de las geometrías realizadas en Solidworks. Al final se decidió emplearlas para realizar la unión entre las barras que transmiten los desplazamientos y las células de carga, ya que, facilitaba la medición de las fuerzas al permitir ubicar con mayor facilidad y exactitud el punto donde realizar la medición.

#### 5.6. Bushings

La última unión que se ha utilizado ha sido una unión flexible por medio de bushings. Esta unión se basa en una rotativa con goma en su interior, la cual permite cierta traslación por la deformación de la misma goma. Por ello, las fuerzas generadas y por ende las fuerzas transmitidas dependen del desplazamiento relativo y de la velocidad relativa de los componentes unidos. Asimismo, estas fuerzas dependen de la rigidez y el amortiguamiento de la goma, que a su vez varían con las deformaciones sufridas. Por todo ello, el comportamiento de los bushings no es lineal.

Por ese motivo, se intentará no utilizar los bushings al no poder determinar la fórmula que determine su funcionamiento y en caso de utilizarse se supondrá que las deformaciones sufridas no son lo suficiente significantes para variar en exceso las fuerzas sufridas y transmitidas.

## 6. MODELO CAD

Una vez se conoce el simulador y su comportamiento, se procede a verificar el modelo CAD de los simuladores que disponía NAITEC para verificar si las medidas del modelo coincidían con las del simulador y en tal caso utilizar el modelo para obtener y facilitar la posterior introducción de los datos de las masas y de las inercias en los diferentes componentes. Sin embargo, el modelo que se disponía estaba formado por superficies y algunas de las medidas no coincidían con las cotas de los planos. Por esta razón, se tuvo que realizar un nuevo modelo CAD.

Para realizar este modelo CAD del simulador se utiliza el software llamado SOLIDWORKS 2017. Este es un software CAD para modelado mecánico en 2D y 3D, el cual permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción.

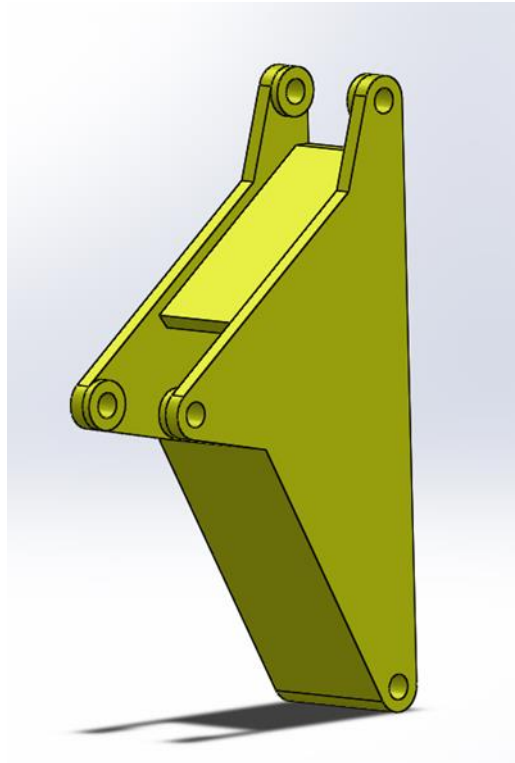
La mayoría de las medidas de los componentes se obtienen de los planos facilitados por NAITEC. Y las demás, como el espesor de algunos componentes, se dedujeron por el peso del componente que aparecía en algunos planos, estimándolas o realizando las mediciones al simulador.

A continuación, se agruparán y se describirán los distintos componentes modelados en el modelo CAD.

### 6.1. Reenvíos

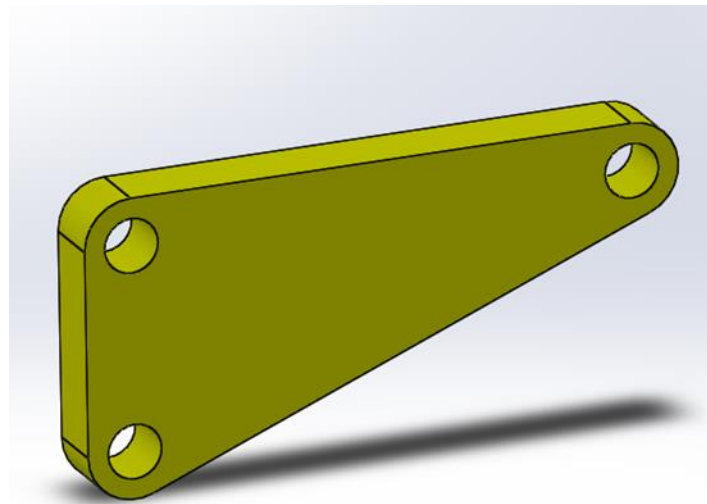
Los reenvíos son los componentes huecos encargados de transmitir los movimientos de los actuadores a las barras o a otros reenvíos en por medio de la rotación.

Como ya se ha visto anteriormente en el simulador se tienen distintos reenvíos con distintas funciones.



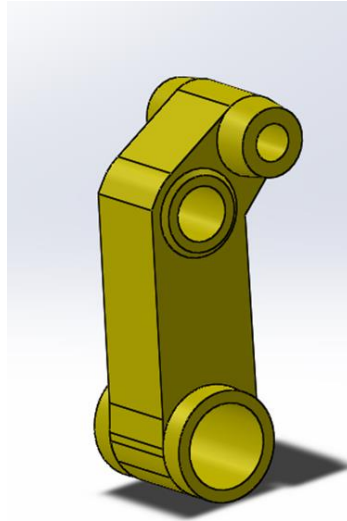
*Ilustración 13 Reenvío longitudinal, lateral 1, lateral 2 y lateral 3, FUENTE: SOLIDWORKS*

El reenvío longitudinal o lateral se encarga de unir los actuadores con las barras o struts longitudinales y laterales.



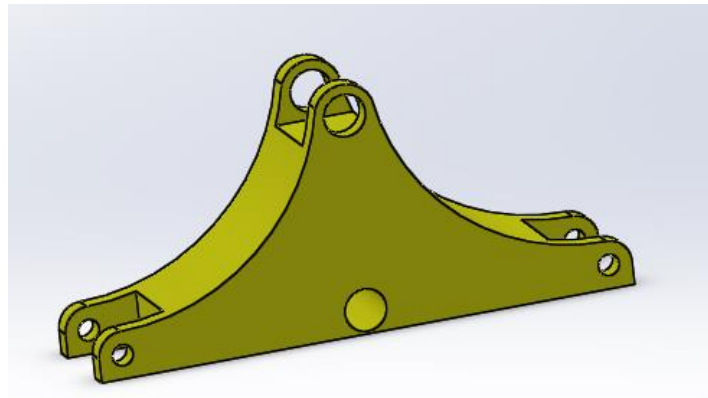
*Ilustración 14 Reenvío vertical, FUENTE: SOLIDWORKS*

El reenvío vertical se encarga de transmitir los desplazamientos del actuador vertical al reenvío de central.



*Ilustración 15 Reenvío brake, FUENTE: SOLIDWORKS*

El reenvío brake se encarga de transmitir los los desplazamiento del actuador de brake al reenvío central.



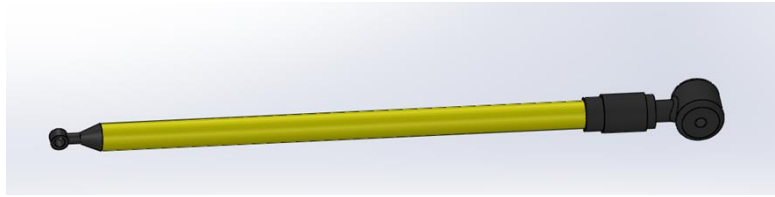
*Ilustración 16 Reenvío central, FUENTE: SOLIDWORKS*

El reenvío central se encarga de transmitir el desplazamiento del reenvío vertical o el reenvío de brake a las barras o struts verticales.

## 6.2. Barras o struts

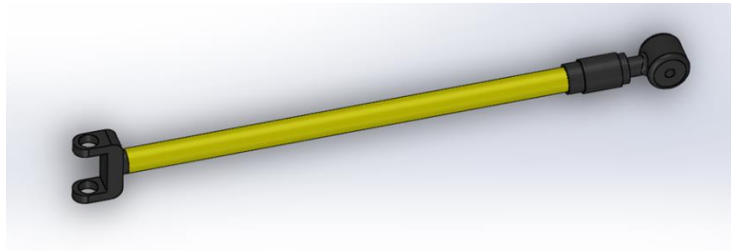
Son barras huecas cuya función es la transmisión del desplazamiento de un reenvío a otro componente convirtiendo su rotación en un desplazamiento lineal. Para ello, disponen de diferentes componentes en sus extremos que facilitan la unión y la transmisión del desplazamiento, además de tener en sus extremos las células de cargar en las que se miden las fuerzas.

Por otro lado, también se tiene una barra central cuya función es la unión las dos barras verticales y transmitir a ambas el desplazamiento de la barra longitudinal.



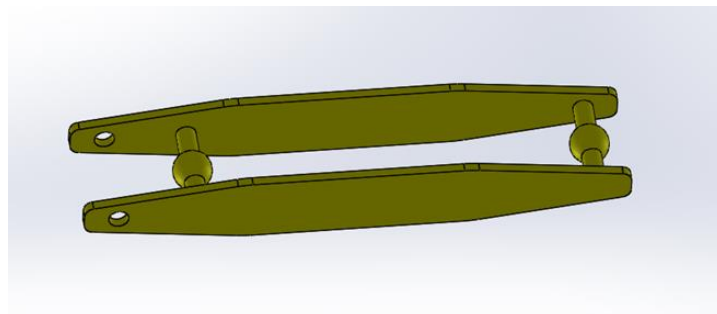
*Ilustración 17 Barra o struts laterales, FUENTE: SOLIDWORKS*

Las Barras o struts laterales se encargan de transmitir el desplazamiento de los reenvío laterales a las barras verticales.



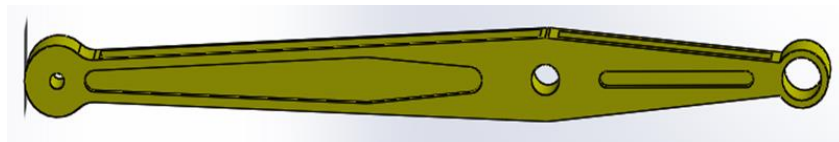
*Ilustración 18 Barra o strut longitudinal, FUENTE: SOLIDWORKS*

La barra o strut longitudinal se encarga de transmitir el desplazamiento del reenvío longitudinal a la barra central.



*Ilustración 19 Barra o strut central, FUENTE: SOLIDWORKS*

La barra o strut central se encarga de transmitir el desplazamiento longitudinal a las barras verticales.

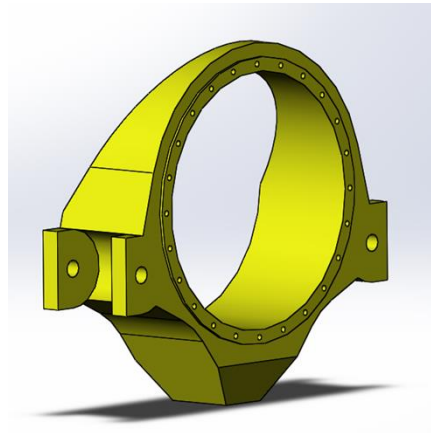


*Ilustración 20 Barra o strut vertical, FUENTE: SOLIDWORKS*

Las barras o struts verticales se encargan de transmitir el desplazamiento vertical, el desplazamiento lateral y el momento de brake al Swift.

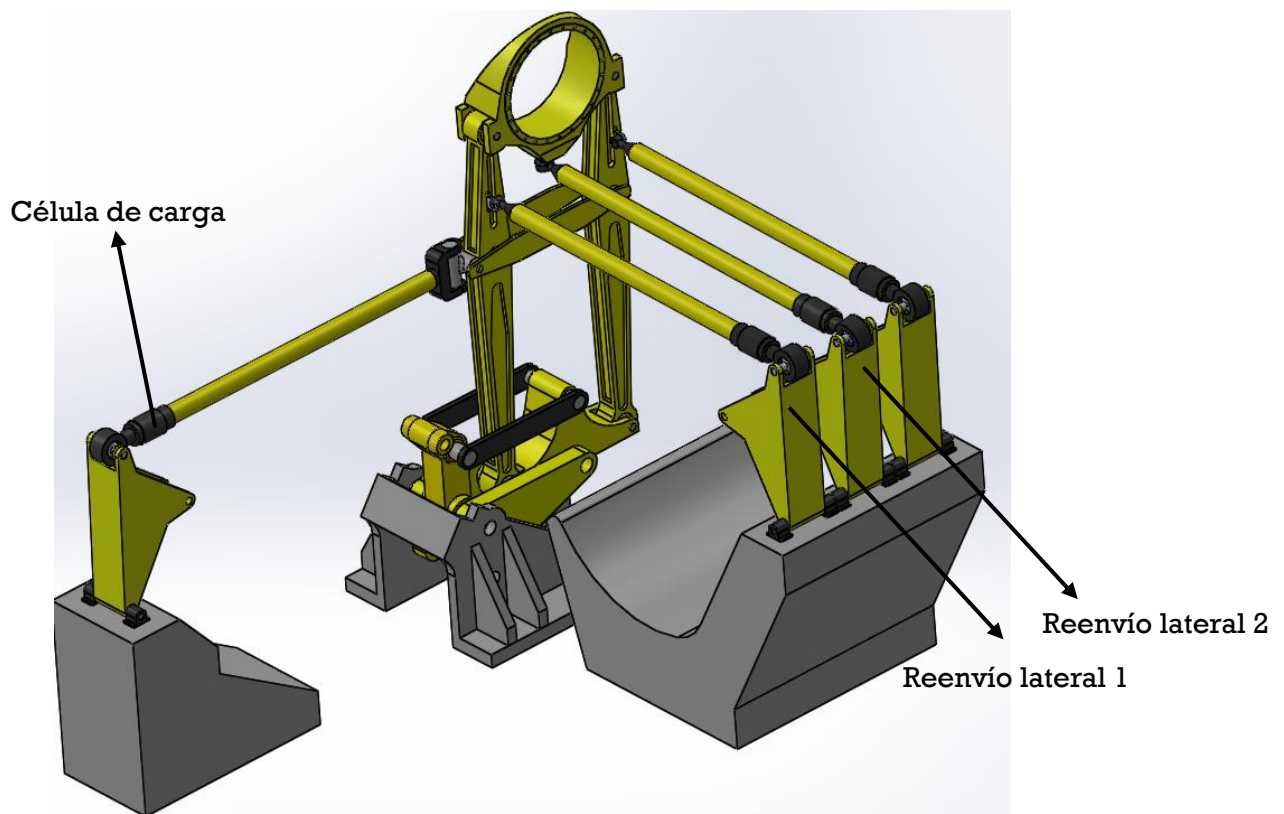
### 6.3. Swift

El Swift es el componente que actúa como la rueda del vehículo, es por ello, que es el componente al que se le transmiten todos los desplazamientos. En su interior introduce un disco con sensores en el que se unirá el componente que se quiera verificar.



*Ilustración 21 Swift, FUENTE: SOLIDWORKS*

El resultado final al unir los distintos componentes visto previamente mediante relaciones es un modelo CAD en SOLIDWORKS capaz de realizar los mismos movimientos que el simulador de carreteras.



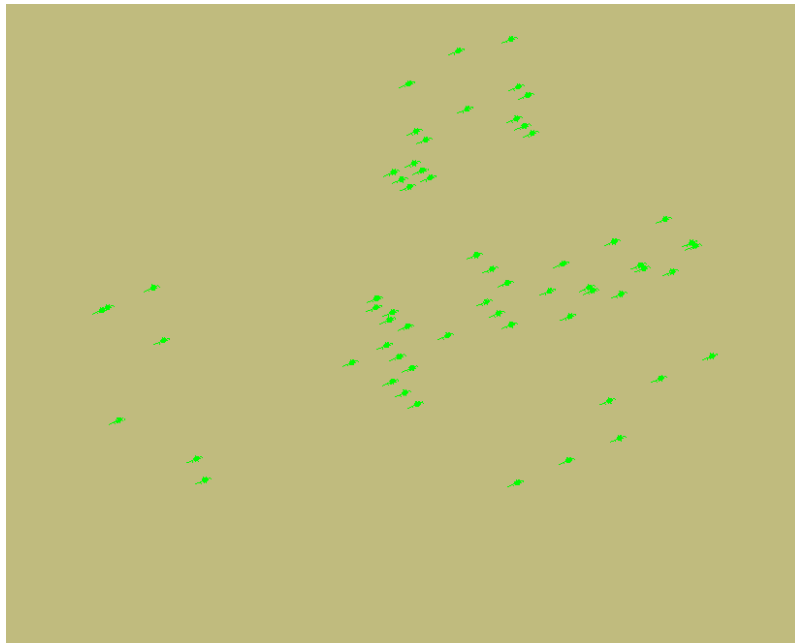
*Ilustración 22 Modelo CAD del simulador, FUENTE: SOLIDWORKS*



## 7. MODELO EN ADAMS

Con los componentes del simulador definidos, se realizó el modelo dinámico y cinemático del simulador. Para ello se ha utilizado el software llamado ADAMS, este es un software de simulación dinámica multicuerpo que permite observar las distribuciones de cargas y fuerzas que se desarrollan en los componentes definidos previamente a causa de un movimiento o una acción externa.

El primer paso que se realiza es la determinación de las cotas de los puntos de unión entre los distintos componentes del simulador por medio de distintos planos del conjunto. Una vez introducidos el conjunto de puntos se procede a modelizar los distintos componentes del modelo.



*Ilustración 23 Conjunto de puntos del modelo, FUENTE: ADAMS*

A continuación, se modelizaron los distintos componentes del simulador por medio de geometrías simples como cilindros huecos, esferas y toroides. Gracias al trabajo previo realizado en la obtención de las cotas y de las posiciones relativas de los puntos que limitaban cada componente esta tarea se pudo realizar de manera rápida y eficiente.

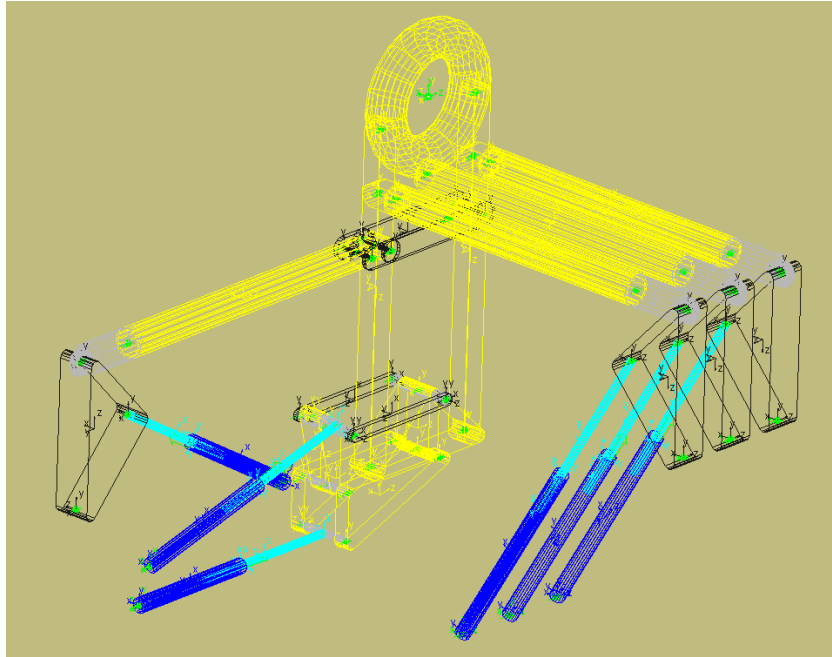


Ilustración 24 Conjunto de puntos y piezas del modelo, FUENTE: ADAMS

Después, se introdujeron los distintos tipos de uniones y contactos existentes entre los componentes, algo de vital importancia para garantizar un comportamiento lo más fiel a la realidad. Además, para garantizar el correcto funcionamiento de estos, a medida que se introducían se hacían simulaciones del comportamiento de estos encadenando poco a poco todos los componentes entre sí.

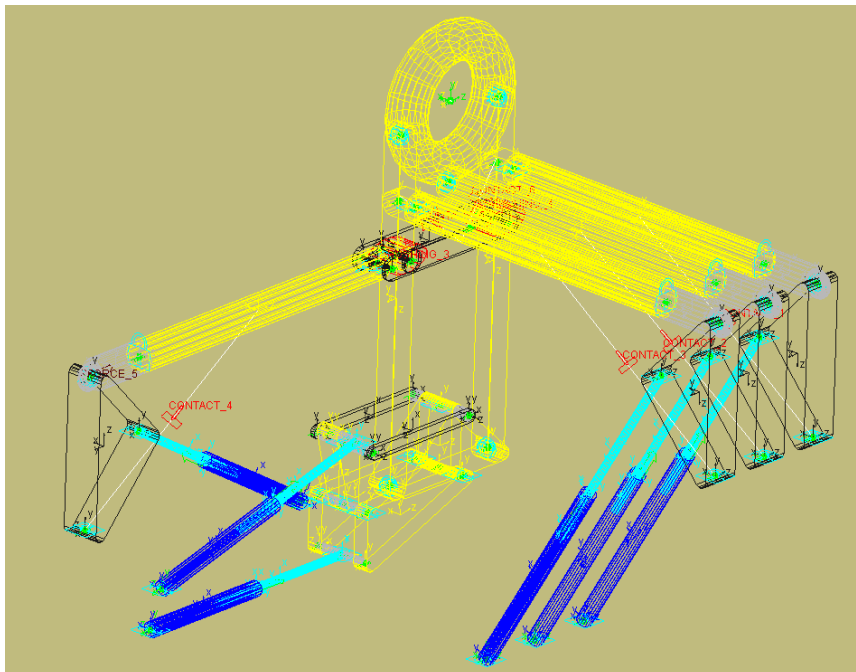
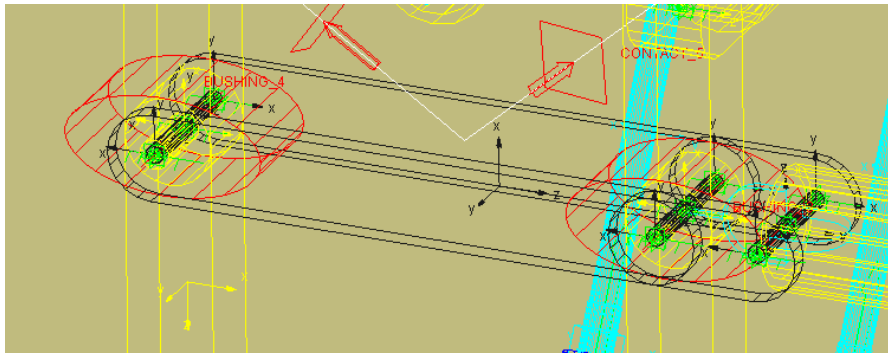
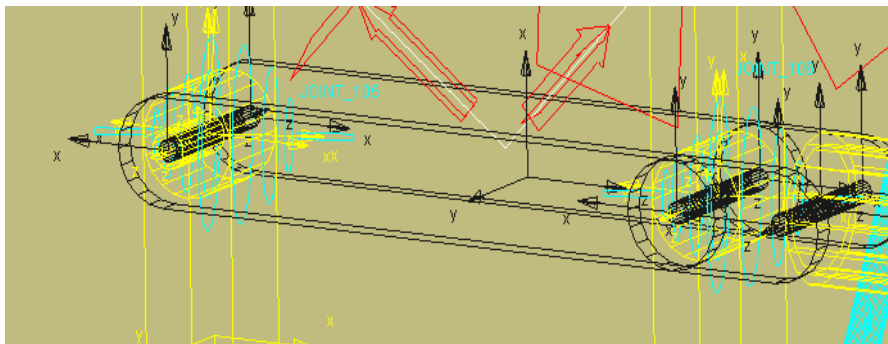


Ilustración 25 Conjunto de puntos, piezas y uniones del modelo, FUENTE: ADAMS

Aunque este paso en general no generó ningún problema, gracias entre otras cosas a la inversión previa en la comprensión de los mecanismos que conforman el simulador y a la realización del modelo CAD, hubo un parte en la que sí se dieron algunos problemas. Esto ocurrió en la unión entre las barras verticales y la barra central, ya que, en los planos que disponía el centro no se apreciaba si la unión entre las barras verticales a la barra central era por medio de una rótula o por medio de bushings. Primero se intentó por medio de rótulas, ya que, en caso de usarse bushings no se disponían datos suficientes para modelizarlos. Al final, ante los errores en las simulaciones del modelo se llegó a la conclusión de que estas uniones debían ser por medio de bushings tal y como se aprecia en las siguientes imágenes.



*Ilustración 26 Unión de la barra central con las barras verticales por medio de bushings, FUENTE: ADAMS*



*Ilustración 27 Unión de la barra central con las barras verticales por medio de rotulas, FUENTE: ADAMS*

En el siguiente paso se definieron completamente los componentes del modelo introduciéndoles sus masas y sus inercias. Al estar el modelo compuesto por geometrías simplificadas para introducir estos datos se trabajó conjuntamente con los softwares SOLIDWORK y ADAMS. Por un lado, se obtuvieron las masas por medio de las herramientas de cálculo de SOLIDWORKS. Y por otro lado, importando las geometrías de los componentes desde SOLIDWORKS a ADAMS se pudo calcular las inercias de los componentes. Una vez se obtuvo toda esta información se pudo definir completamente los componentes simplificados del modelo del simulador.

Por último, se verificó la capacidad del modelo de transmitir los movimientos generados por los actuadores a los diferentes componentes. Para ello, se realizó una simulación en la que se introdujo señales senoidales de desplazamiento en todos los actuadores. Al no observarse ningún error durante la simulación se dio por válido este primer modelo del simulador.

## 8. VERIFICACIÓN GEOMÉTRICA

### 8.1. Planteamiento

Con el primer modelo del simulador terminado el siguiente paso fue realizar la verificación geométrica, para comprobar que para una misma entrada en los actuadores las respuestas del modelo y del simulador son lo suficiente similares para ser admisibles, ya que, sería imposible obtener un modelo cuya respuesta fuese idéntica a la del simulador.

Para realizar la verificación geométrica se obtuvieron los datos de entrada de todos los actuadores durante el ensayo de un eje trasero, además de recopilar los desplazamientos del Swift. En esta verificación no fue necesario que la toma de datos se hiciese con el simulador en vacío, ya que, al ser una verificación geométrica se utilizarían los desplazamientos y estos no se ven afectados por el hecho de que se tenga una pieza equipada, esto aumentará los esfuerzos que deberán realizar los actuadores para obtener ese desplazamiento, pero no al desplazamiento.

### 8.2. Tratamiento de los datos

El primer paso de la verificación geométrica trata de encontrar el método para introducir los datos de los desplazamientos de los actuadores, ya que, debido a que la versión que se disponía del software de ADAMS era antigua no se conseguía importar los datos adecuadamente.

En un primer momento se intenta importar los datos para generar una tabla con la cantidad de puntos necesarios y posteriormente copiar y pegar directamente desde la tabla proporcionada, pero no dio resultado.

Visto esto, se utiliza el software MATLAB para hacer un primer tratamiento de los datos en el cual se genera un único vector combinando los datos de tiempo y desplazamiento. Y posteriormente se exporta en un formato compatible con Excel, lo que ya permite introducir los datos en tablas de desplazamiento de ADAMS.

	X	Y
1	0.0	18.232101
2	1.953125E-003	18.237574
3	3.90625E-003	18.237574
4	5.859375E-003	18.23575
5	7.8125E-003	18.23575
6	9.765625E-003	18.23575
7	1.171875E-002	18.237574
8	1.3671875E-002	18.237574
9	1.5625E-002	18.232101
10	1.7578125E-002	18.232101
11	1.953125E-002	18.237574
12	2.1484375E-002	18.237574
13	2.34375E-002	18.23575
14	2.5390625E-002	18.232101
15	2.734375E-002	18.230278
16	2.9296875E-002	18.239397
17	3.125E-002	18.237574
18	3.3203125E-002	18.23575
19	3.515625E-002	18.237574
20	3.7109375E-002	18.23575
21	3.90625E-002	18.239397
22	4.1015625E-002	18.241222
23	4.296875E-002	18.241222
24	4.4921875E-002	18.246695

*Ilustración 28 Desplazamiento del actuador vertical, FUENTE: ADAMS*

No obstante, durante el desarrollo del proyecto se encontró otra forma de realizar esta labor. Esta forma consistía en guardar la tabla con los desplazamientos en un formato concreto del Excel, con el cual al importarlo a ADAMS se podía generar la tabla sin necesidad de realizar ningún tratamiento de datos previo.

### 8.3. Medición de las respuestas

Una vez se introdujo las tablas con los desplazamientos, se le asigna a cada actuador el desplazamiento correspondiente. A continuación, se genera una pieza en el centro del Swift para utilizarla como referencia durante la medición del desplazamiento del componente, por ello para que mantuviese su posición durante las simulaciones se hizo que fuese parte del ground.

Posteriormente se crean tres mediciones para tomar el desplazamiento relativo del Swift con el ground, utilizando para ello la componente creada anteriormente. Estas medidas darán el desplazamiento sufrido por Swift en las direcciones X, Y y Z generales, consultar ilustración 36.

### 8.4. Resultados

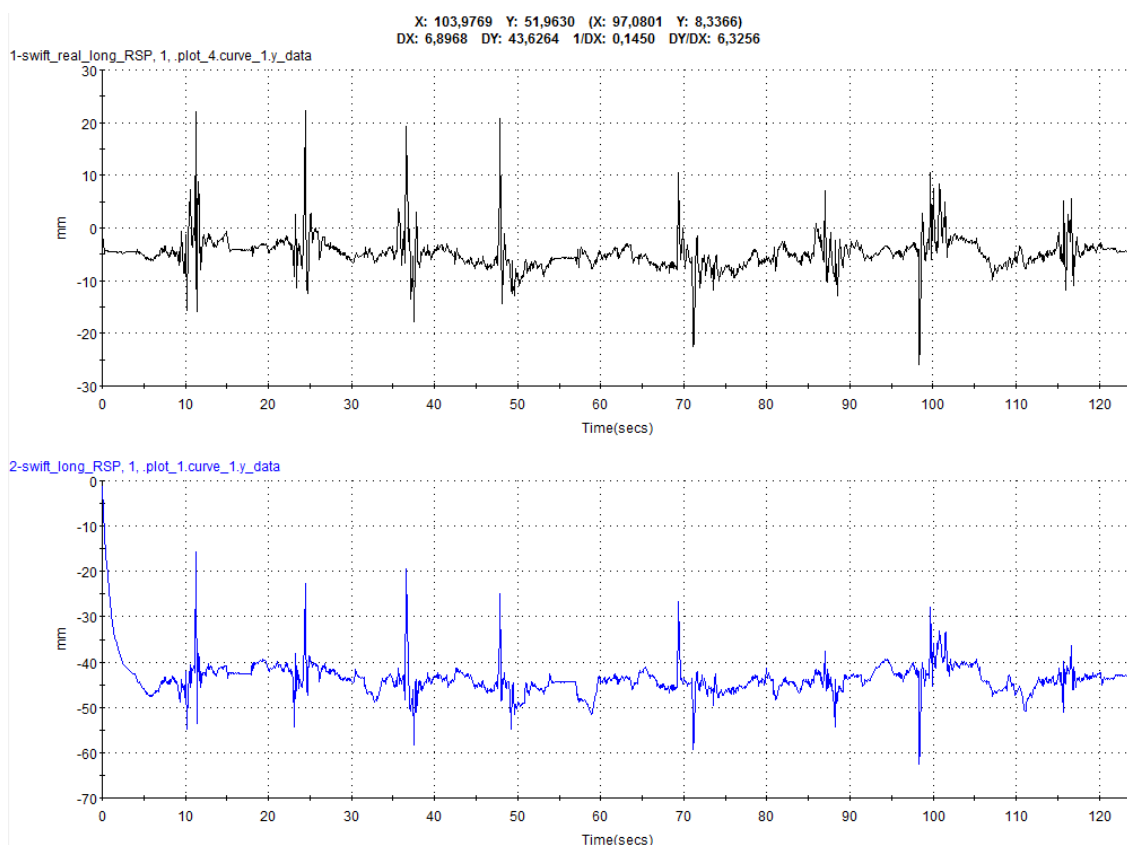
Hecho todo lo mencionado anteriormente, se procede a realizar la simulación. Esta primera simulación se realizó durante 123.99 segundos y con una frecuencia de

muestreo de 512 Hz para asegurar que la cantidad de datos recogidos por las mediciones fuese la misma que la proporcionada en la realidad, facilitando de este modo la comparación entre los desplazamientos del simulador y del modelo.

A continuación, los datos del modelo se exportan al software RPC, un software que permite el análisis y comparación de datos de manera rápida, y se comparan con los resultados los desplazamientos sufridos en el simulador de carreteras.

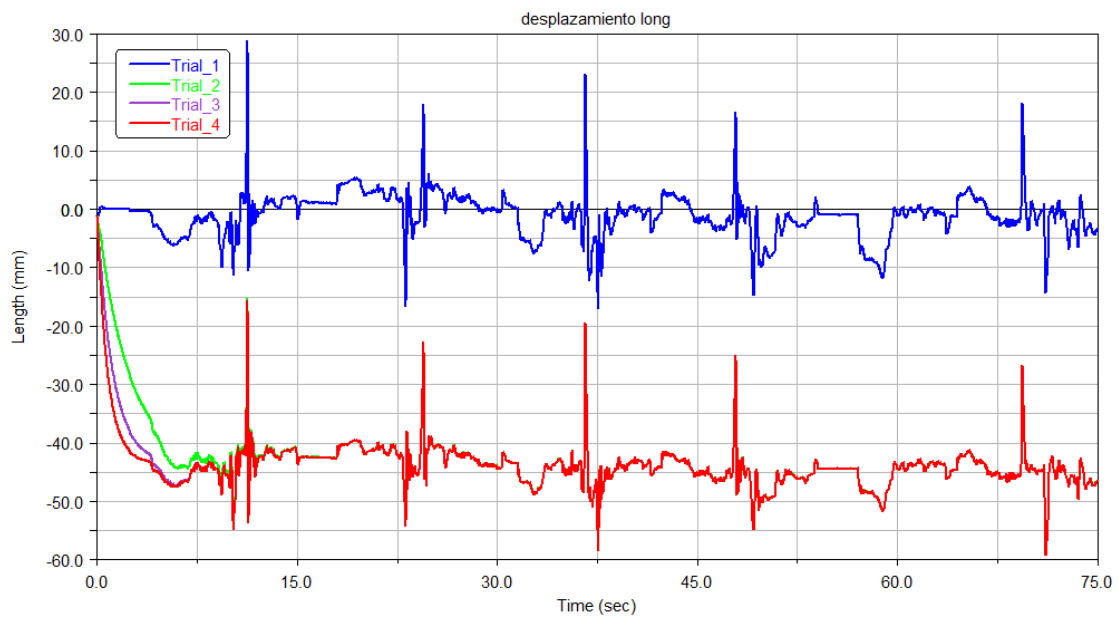
#### 8.4.1. Desplazamiento longitudinal

Se analiza el desplazamiento longitudinal que se ha dado en modelo y el desplazamiento longitudinal real del Swift del simulador. Para ello, como se ha dicho anteriormente se ha empleado el software RPC con el cual se podrán sacar el grado de error que se comete con el modelo.



*Ilustración 29 Verificación geométrica, desplazamiento longitudinal, FUENTE: RPC*

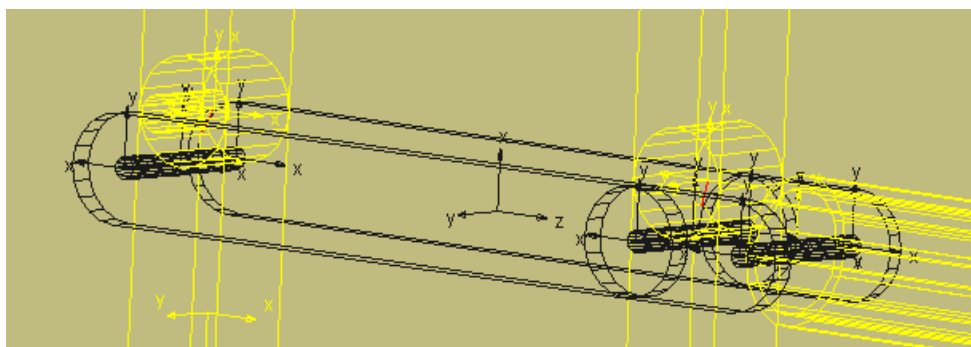
Lo primero que se observa es un salto inicial en el desplazamiento del modelo que no se da en la realidad. En un principio se piensa que es debido a los bushings, ya que, al no conocer los factores de rigidez estos pueden ser la causa de ese salto inicial, el cual desaparece cuando el mecanismo se estabiliza. Por lo tanto, se decide crear unas variables de rigidez para introducirlas en los bushings y de esta manera poder calcular un valor de rigidez más próximo a la realidad, para ello se realiza un proceso de iteración por medio de una herramienta de ADAMS.



*Ilustración 30 Proceso de iteración del valor de la rigidez, FUENTE: RPC*

Durante el proceso de iteración de 75 segundos de duración, la variable de rigidez toma distintos valores dentro del rango que se le establece, el cual es el siguiente, entre 0 y 100 Newton/mm. Posteriormente, se analizan los datos obtenidos de este proceso.

En la primera iteración el valor de la rigidez en las tres direcciones es nulo, aun siendo este nulo el modelo tiene una respuesta similar a la real y además no se aprecia ese salto inicial. Sin embargo, aun no apareciendo este salto en la gráfica sí que se manifiesta en la simulación en forma de un desfase de la pieza que conecta las dos barras verticales, la cual sigue tardando en moverse al mismo tiempo que las demás piezas.

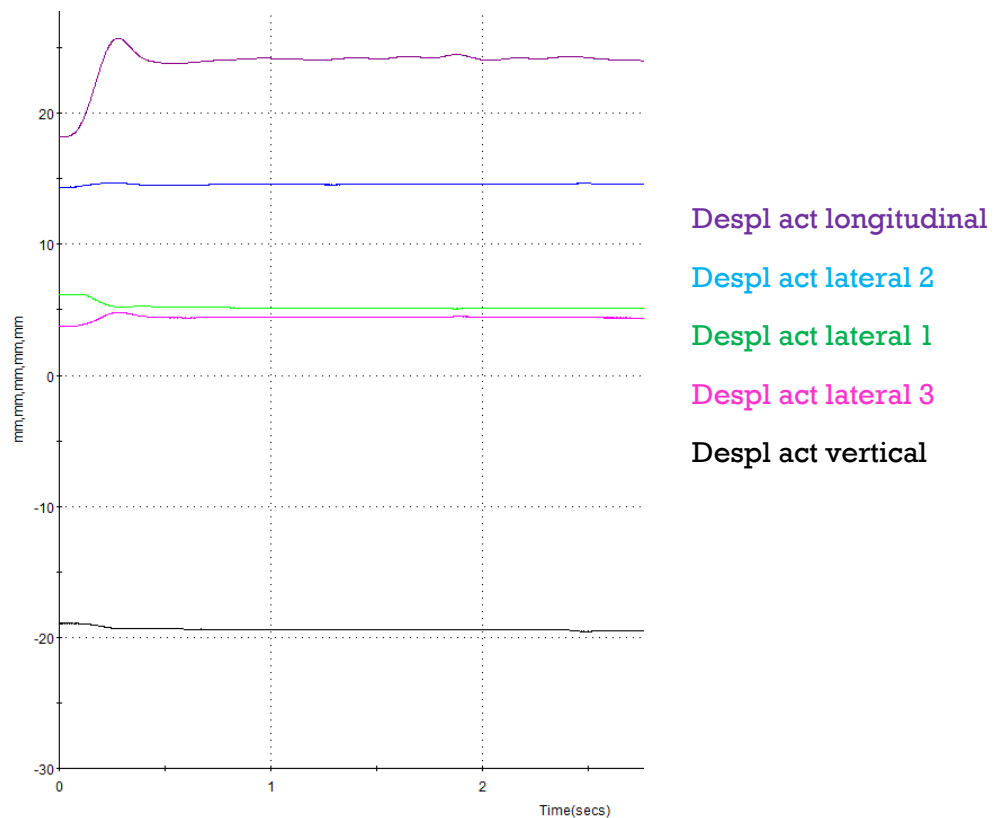


*Ilustración 31 Desfase entre la barra central y las barras verticales, FUENTE: ADAMS*

En las siguientes iteraciones el valor de rigidez en las tres direcciones toma los siguientes valores: 33.33, 66.67 y 100. Como se puede observar con estos valores de rigidez la respuesta del modelo prácticamente no varía y tampoco se soluciona el

problema del salto inicial. Por lo tanto, se decidió verificar los datos de desplazamientos introducidos en los actuadores.

Mientras se analizaba los datos de las entradas del modelo se vio que ningún actuador partía de la posición inicial, es decir, en el instante 0 ya tenía un desplazamiento, además se observa que la entrada longitudinal sufría una variación inicial. Como consecuencia, se generaba un incremento notable en la aceleración, el cual generaba una deformación inicial en los bushings que tardaba en desaparecer, esta deformación se debía principalmente a la entrada longitudinal al tener uno de los valores iniciales altos y a su posterior oscilación.



*Ilustración 32 Posición inicial de los actuadores, FUENTE: RPC*

Para entender mejor este error hay que tener en cuenta la forma en la que el software del simulador mide los desplazamientos que se efectúan en los actuadores. Esta medición se hace de manera relativa, es decir, el software mide y almacena los desplazamientos realizados siempre tomando como referencia la posición del pistón en el momento de realizar la simulación. Por lo tanto, si solo se realiza un tratamiento de los datos para referir los desplazamientos a la posición de reposo de los actuadores se dará este error al comienzo de la simulación. Para evitarlo será necesario introducir un intervalo previo para estabilizar el mecanismo y que este error no contamine los datos de la simulación, en caso de que no se pueda se tendrán en cuenta únicamente los datos posteriores a la estabilización del modelo.



Una vez aclarado el error, se procede a comparar el desplazamiento longitudinal del modelo y del simulador. Para ello en un primer momento se plantea utilizar el error cuadrático medio como criterio, pero se descarta debido a la gran influencia del desfase entre las señales, el cual genera valores del error cuadrático medio altos cuando un pico alto está algo desfasado. Por esta razón se decide utilizar la media para comparar las amplitudes y el periodo de un intervalo para comparar el grado de desfase entre las dos señales.

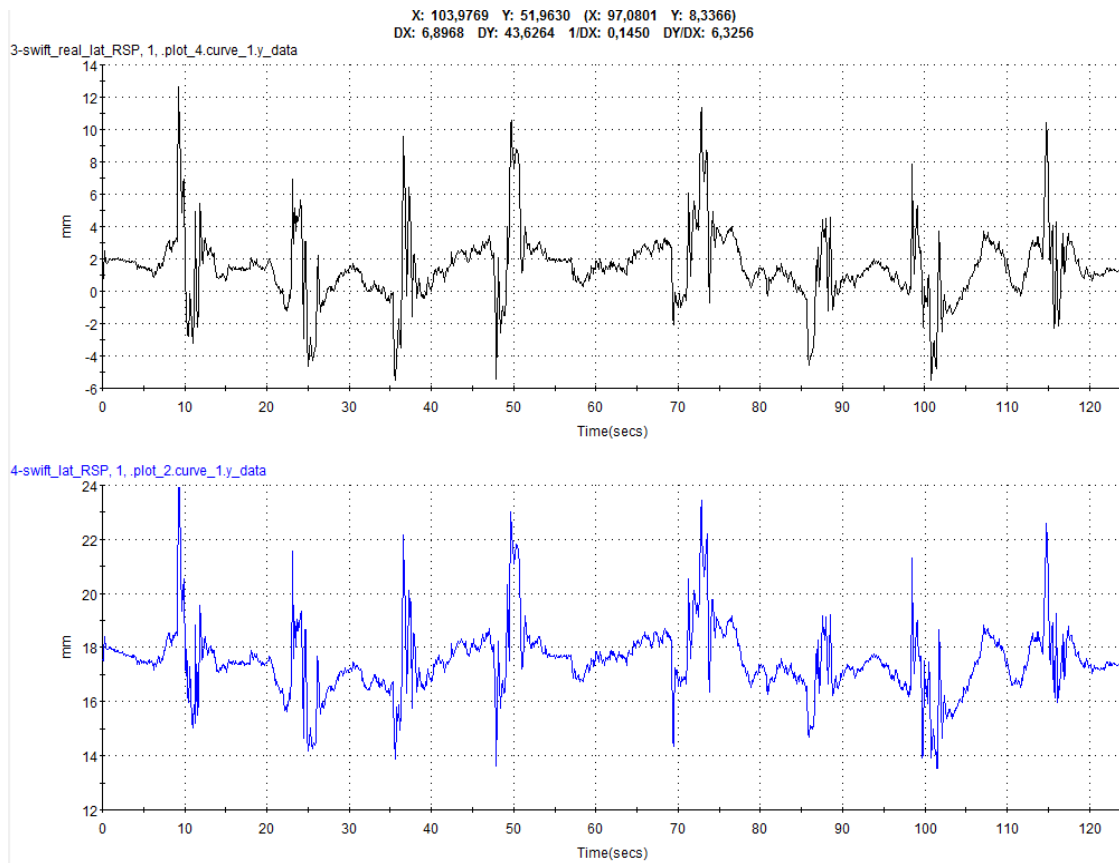
valor medio modelo	2,059 mm
valor medio experimental	-3,253 mm
diferencia	1,194 mm

periodo modelo	0.148 s
periodo experimental	0.117 s
diferencia	0.031 s

Una vez hechos los cálculos se procede a su análisis. Se observa que apenas se produce un desfase entre ambas señales. Sin embargo, sí que se da un error relativo en las amplitudes el cual está en torno al 36 %, el cual es debido principalmente al salto inicial. No obstante, al poder evitar este error en futuras simulaciones y al ser inferior a 40%, límite impuesto por el técnico encargado de realizar las simulaciones, se da por válido el desplazamiento longitudinal obtenido.

#### 8.4.2. Desplazamiento lateral

El siguiente desplazamiento que se analiza es el lateral, es decir el desplazamiento transversal sufrido por las ruedas. Para ello, nuevamente se utiliza el software RPC para visualizar las señales y poder realizar una primera comprobación.



*Ilustración 33 Verificación geométrica, desplazamiento lateral, FUENTE: RPC*

En este caso, se sigue dando un salto inicial aunque no es tan apreciable como en el gráfico del desplazamiento longitudinal. Esto es debido por un lado al hecho de que los desplazamientos iniciales de los actuadores laterales son inferiores al desplazamiento inicial del actuador longitudinal y por otro lado a la no existencia de variaciones iniciales.

Una vez observado que el error inicial también sucede en esta medición, pero en menor medida, se procede a calcular nuevamente la media de ambas señales y el periodo de un intervalo de la señal, con el fin de comprobar si el modelo es capaz de reproducir el desplazamiento lateral del simulador de carreteras.

valor medio modelo	0.319 mm
valor medio experimental	-0.347 mm
diferencia	0.028 mm

periodo modelo	1.164 s
periodo experimental	1.168 s
diferencia	0.004 s

Una vez hechos los cálculos se procede a su análisis. Se observa que en este caso no se da apenas una diferencia entre las amplitudes de los desplazamientos laterales del modelo y del simulador, teniendo únicamente un error relativo en torno al 8 %. Además, nuevamente el desfase que se da entre ambas señales es despreciable. Por todo ello, se da como satisfactorio la simulación del desplazamiento lateral.

#### 8.4.3. Desplazamiento vertical

Por último, se realiza la misma verificación realizada anteriormente para el desplazamiento vertical, utilizando nuevamente el software RPC para realizar una primera comprobación.

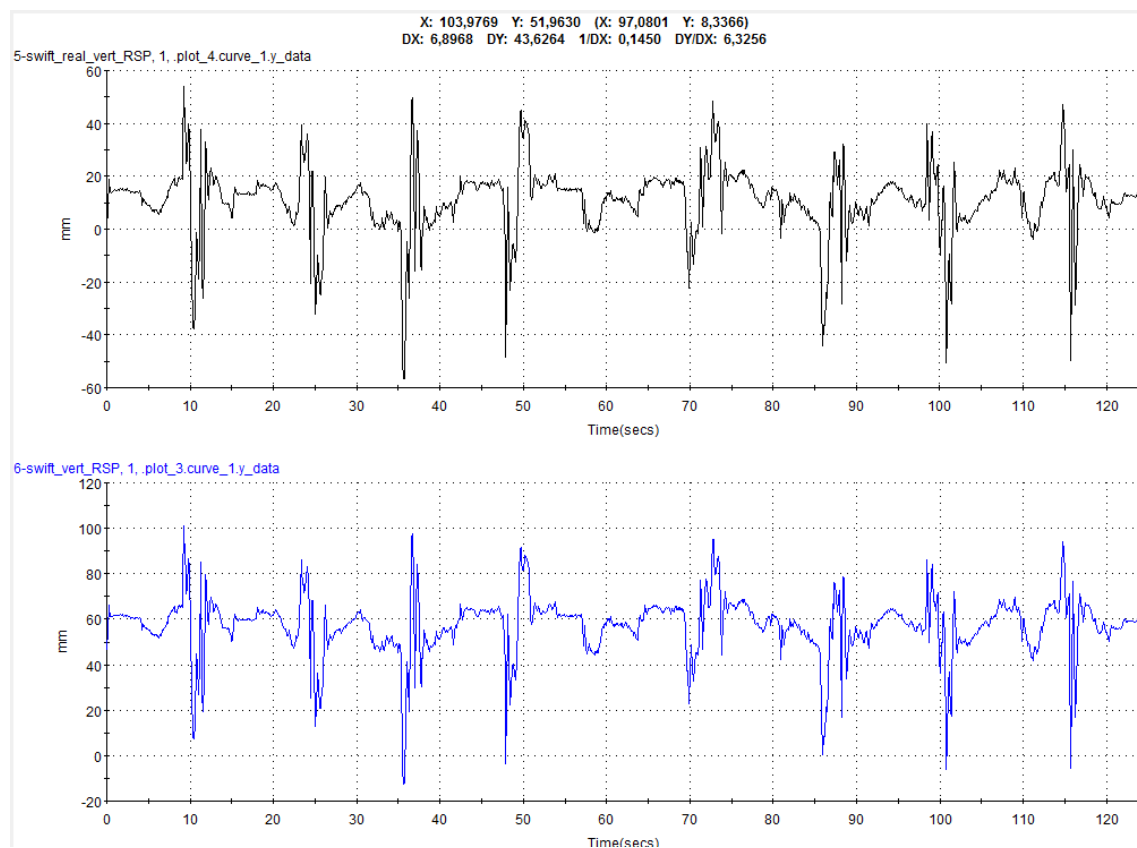


Ilustración 34 Verificación geométrica, desplazamiento vertical, FUENTE, RPC

En este caso al igual que en el caso anterior se sigue dando un salto inicial aunque no se llega a apreciar en el gráfico. Al ser la entrada vertical similar a la longitudinal se deduce que la causa principal del salto inicial es una rápida oscilación junto con un salto inicial en los desplazamientos del actuador.

A continuación, se procede a calcular nuevamente la media de ambas señales y el periodo de un intervalo de la señal, con el fin de comprobar si el modelo es capaz de reproducir el desplazamiento vertical del simulador de carreteras.

valor medio modelo	-2.548 mm
valor medio experimental	-2.411 mm
diferencia	0.137 mm

periodo modelo	0.262 s
periodo experimental	0.273 s
diferencia	0.012 s

Una vez hechos los cálculos se procede a su análisis. Se observa que en este caso no se da apenas una diferencia entre las amplitudes del desplazamiento vertical del modelo y del simulador, teniendo únicamente un error relativo en torno al 6 %. Además, nuevamente el desfase que se da entre ambas señales es despreciable. Por lo tanto, se da como satisfactorio la simulación del desplazamiento vertical. De esta manera se comprueba que la simulación cinemática del modelo cumple con lo requerido y reproduce el comportamiento real de la máquina con un alto grado de éxito.

## 9. VERIFICACIÓN DINÁMICA: PRIMERA ADQUISICIÓN

### 9.1. Planteamiento

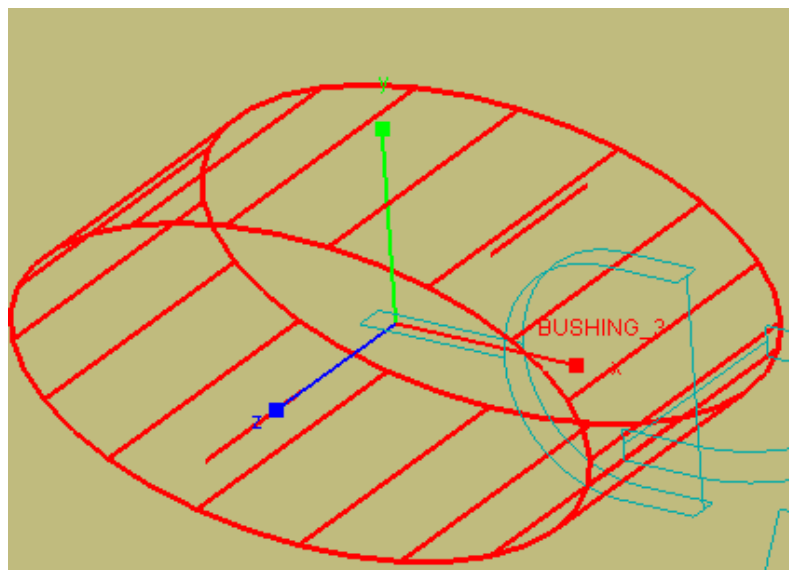
Con la verificación geométrica realizada el siguiente paso es plantear cómo realizar la verificación dinámica del modelo, con la cual se garantizará que ante los mismos desplazamientos de los actuadores del modelo y del simulador las fuerzas percibidas en las células de cargas sean similares. Además de lo anterior, también se busca determinar la cantidad de bushings que tiene el simulador, ya que, este dato no se dispone debido a la falta de planos del simulador.

Antes de comenzar con la verificación dinámica, se decide que el modo en el cual se van a justar las mediciones de las células de carga será por medio del ajuste de los dos bushings que se dispone. Para ello se analiza los parámetros que definen estos en el programa ADAMS.

Name	BUSHING_1
Action Body	ground
Reaction Body	PART_2
Translational Properties (x,y,z components):	
Stiffness	(18.0(newton/meter)),(18.0(newton/meter)),(18.0(newton/meter))
Damping	(4.5(newton-sec/meter)),(4.5(newton-sec/meter)),(4.5(newton-sec/meter))
Preload	0.0,0.0,0.0
Rotational Properties (x,y,z components):	
Stiffness	(6.8067840828E-003(newton-meter/deg)),(6.8067840828E-003(newton-meter/deg)),(6.8067840828E-003(newton-meter/deg))
Damping	(1.7278759595E-003(newton-meter-sec/deg)),(1.7278759595E-003(newton-meter-sec/deg)),(1.7278759595E-003(newton-meter-sec/deg))
Preload	0.0,0.0,0.0
Force Display	On Action Body

*Ilustración 35 Parámetros de los bushings, FUENTE: ADAMS*

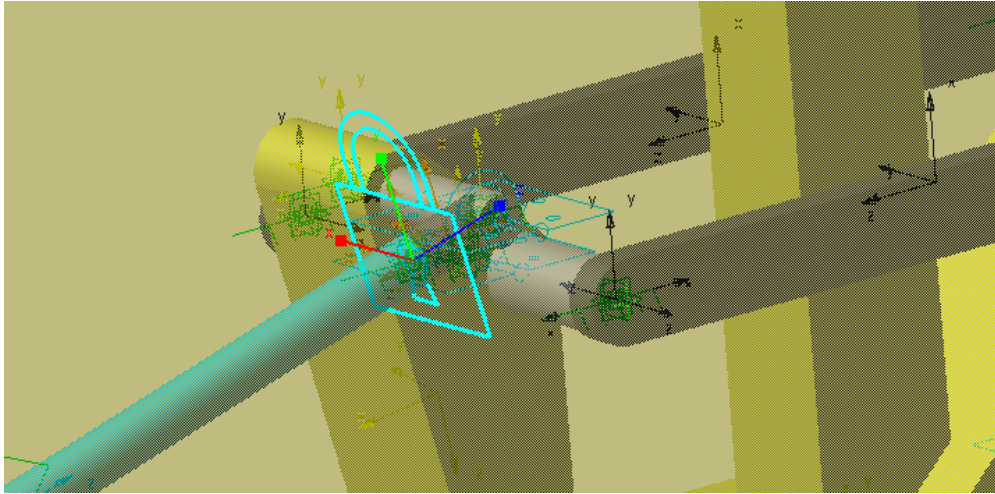
Se observan los distintos parámetros con los que se define un bushings en ADAMS. Por una parte, están la rigidez y el amortiguamiento axial, por otro lado, están la rigidez y amortiguamiento rotacional. Combinando ambos se ajustarán las diferentes mediciones.



*Ilustración 36 Representación del bushing en ADAMS junto con direcciones generales del modelo, FUENTE: ADAMS*

En cuanto a los componentes axiales, el componente Z de los dos bushings será el que mayor influencia tenga en las mediciones laterales mientras que el componente X será el que más influya a la medición longitudinal. Por otro lado, en cuanto a los componentes rotacionales, el componente Z de los dos bushings será el que mayor influencia tenga en la medida longitudinal mientras que el componente X influirá más a las mediciones laterales.

Por último, antes de terminar la planificación del proceso de verificación dinámica se modifica la zona del reenvío de brake del modelo para poder medir las fuerzas en la misma dirección en la que mide la célula de carga. Esta dirección es la dirección del componente Z del nuevo joint o unión.



*Ilustración 37 Modificación de la zona del reenvío brake, FUENTE: ADAMS*

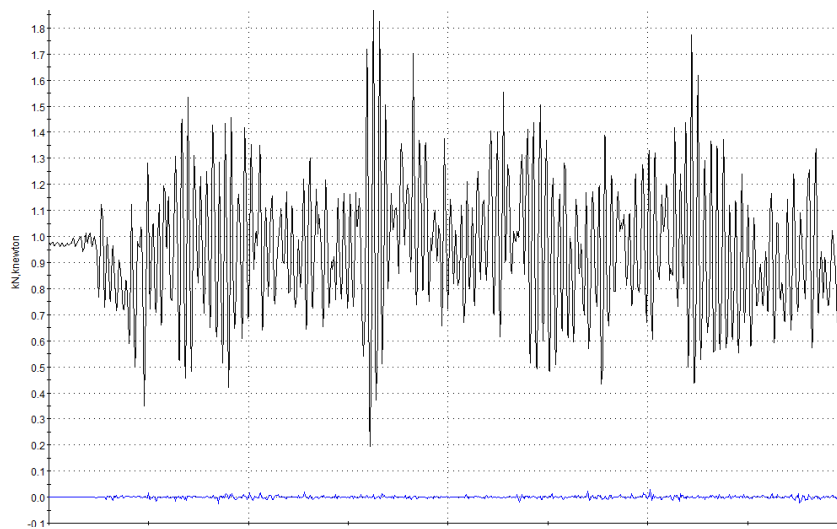
## 9.2. Primera adquisición

Una vez fijado el planteamiento del procedimiento para ajustar el modelo a los datos experimentales, se procede a realizar una adquisición de datos del simulador de carreteras. En esta ocasión el ensayo se hace en vacío, ya que, en caso de que el simulador tuviese algún componente equipado este debería ser modelado e introducido al tener una masa que modificaría las fuerzas medidas. Al ser confidenciales estas piezas no había posibilidad de tomar medidas para su modelización, por tanto, se decide realizar este ensayo en vacío introduciéndole desplazamientos aleatorios al centro del Swift y tomando las mediciones de fuerzas en las células de carga.

Una vez se hizo un tratamiento a los datos adquiridos, como ya se hizo anteriormente en la verificación geométrica, se introducen los inputs en los actuadores del modelo y se realiza una simulación.

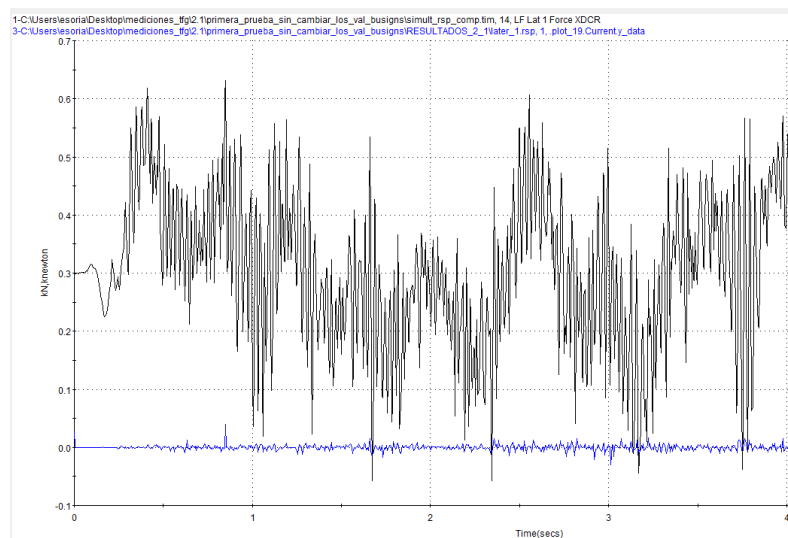
## 9.3. Análisis de los resultados

Una vez ejecutado una simulación de 4 segundos se almacenan los datos y se procede a realizar una primera comparación entre los datos experimentales y los del modelo. En esta primera comparación se busca que las mediciones estén en un rango cercano a las experimentales, de manera que, el modelo este lo más próximo a la realidad antes de empezar con las iteraciones de los bushings.



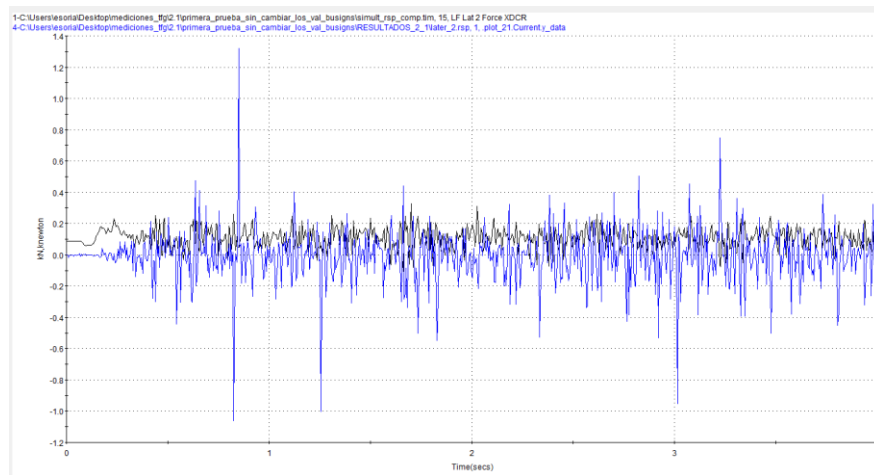
*Ilustración 38 Primera comparación de las fuerzas longitudinales, FUENTE: RPC*

En el caso de la medición de la célula de carga longitudinal se aprecia una clara diferencia en las amplitudes entre la medición la experimentales y las del modelo.



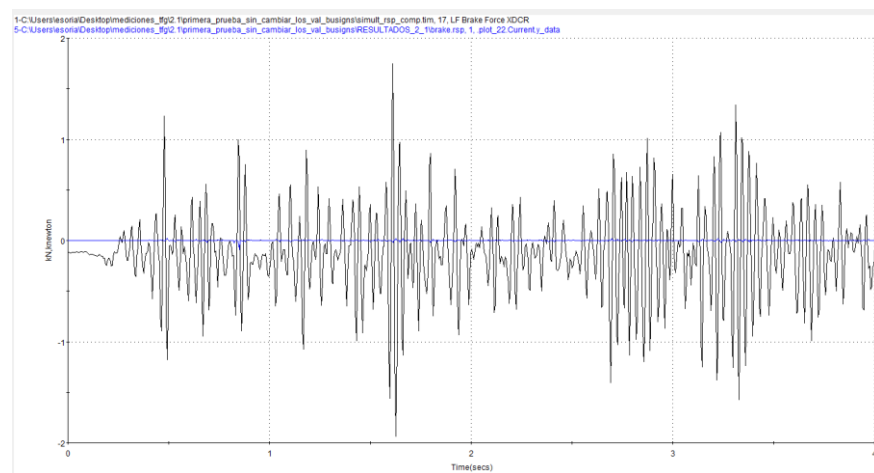
*Ilustración 39 Primera comparación de las fuerzas laterales 1, FUENTE: RPC*

En el caso de la medición de la célula de carga lateral 1 se aprecia una clara diferencia en las amplitudes experimentales y las del modelo. Lo mismo ocurre con la medición de la célula de carga del lateral 3.



*Ilustración 40 Primera comparación de las fuerzas laterales 2, FUENTE: RPC*

En el caso de la medición de la célula de carga del lateral 2 se aprecia que, a diferencia con la medida de los otros laterales, en este caso la amplitud que se da en el modelo es superior a la experimental.



*Ilustración 41 Primera comparación de las fuerzas de brake, FUENTE: RPC*

Por último, en cuanto a la medición realizada por la célula de carga de brake se aprecia la misma situación dada en la medición longitudinal, lateral 1 y lateral 3.

Teniendo en cuenta la gran diferencia en los rangos de las amplitudes de las señales del modelo, se decide realizar una primera iteración de los dos únicos bushings del modelo centrándose en conseguir que las señales del modelo estén en un rango similar a las experimentales. Pero principalmente intentado ajustar la medición longitudinal.



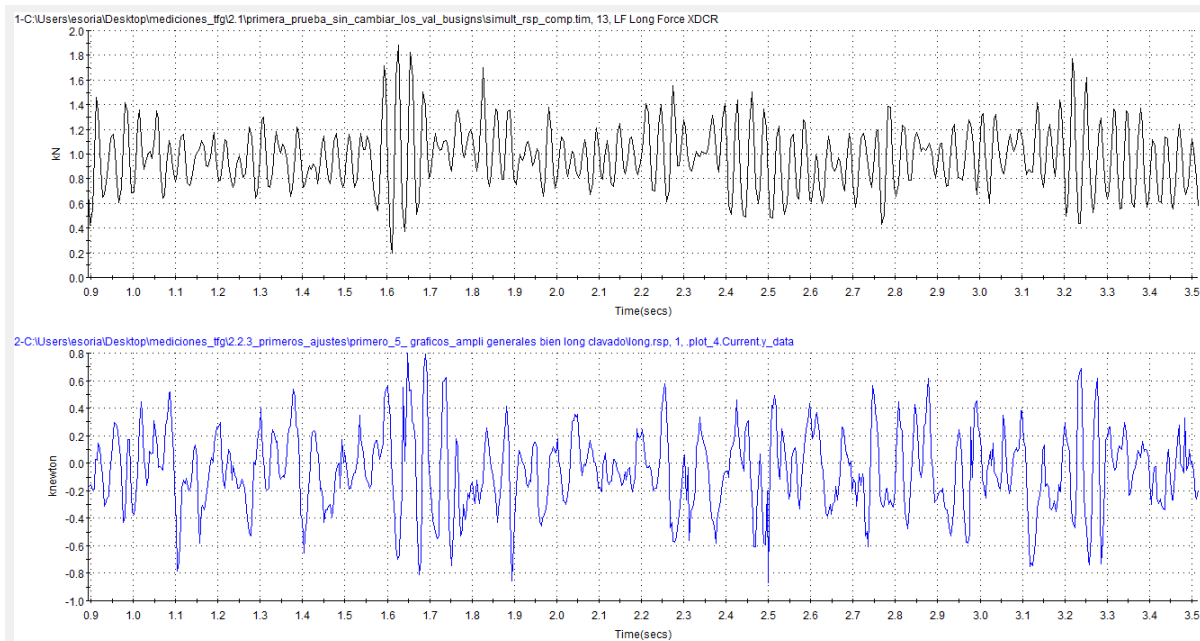
#### 9.4. Modelo de 2 bushings: Primera iteración

Como ya se ha comentado, después de analizar la primera simulación se procede a iterar los distintos valores de la rigidez y el amortiguamiento de los bushings. Para optimizar este proceso de calibración, se decide realizar este proceso por medio de la herramienta de iteraciones de ADAMS. Previamente a iterar, se buscan los valores límites de rigidez, para que la rigidez no sea demasiado baja, lo cual no permitiría una correcta transmisión de los desplazamientos, pero tampoco demasiado alta, lo cual haría que los bushings dejaran de comportarse como uniones flexibles.

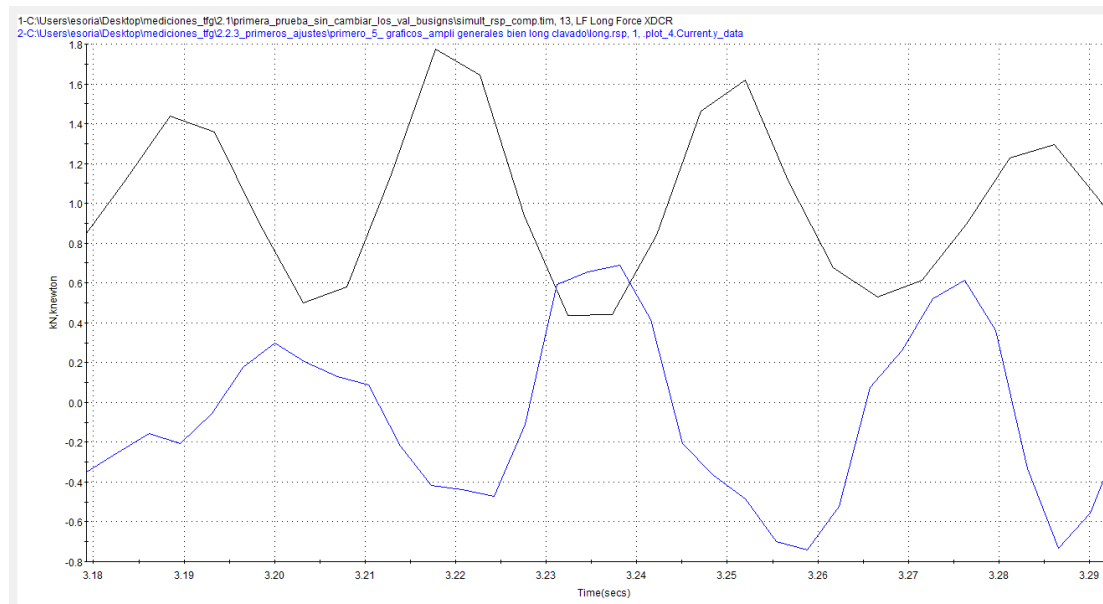
Una vez encontrados estos valores se procede a realizar la iteración. Primero se itera buscando la rigidez adecuada, para ello se observa el intervalo de pico a pico y el desfase para intentar obtener una señal lo menos desfasada posible. Una vez fijado el valor de la rigidez en los bushings, se procede a buscar un valor de amortiguamiento que dé a las medidas una amplitud similar a las experimentales. Estos son los resultados obtenidos:

##### 9.4.1. Longitudinal

A continuación, se compararán los valores experimentales de las fuerzas medidas por la célula de carga longitudinal y los nuevos valores de las fuerzas longitudinales del modelo.



*Ilustración 42 Comparación de las amplitudes de las fuerzas longitudinales en la primera iteración,  
FUENTE: RPC*



*Ilustración 43 Comparación del desfase de las fuerzas longitudinales en la primera iteración, FUENTE: RPC*

Primero, se hace una primera comprobación de los valores de las amplitudes, en la cual teniendo en cuenta el offset de un 1 kN que tiene la medición experimental se da por buena la primera aproximación, aunque se aprecia un mayor ruido en la medición del modelo.

A continuación, se realiza una comprobación más en detalle de los valores de las amplitudes de ambas señales, además de comprobar el desfase que se da entre ellas. Para ello, se decide calcular la media de ambas señales y el periodo de un intervalo concreto. Asimismo, para comprobar más en detalle la diferencia de amplitudes se calcula la amplitud pico a pico de ambas señales en varios puntos de un intervalo.

valor medio modelo	-0.060 kN
valor medio experimental	-0.042 kN
diferencia	0.018 kN

periodo modelo	0.038 s
periodo experimental	0.029 s
diferencia	0.009 s

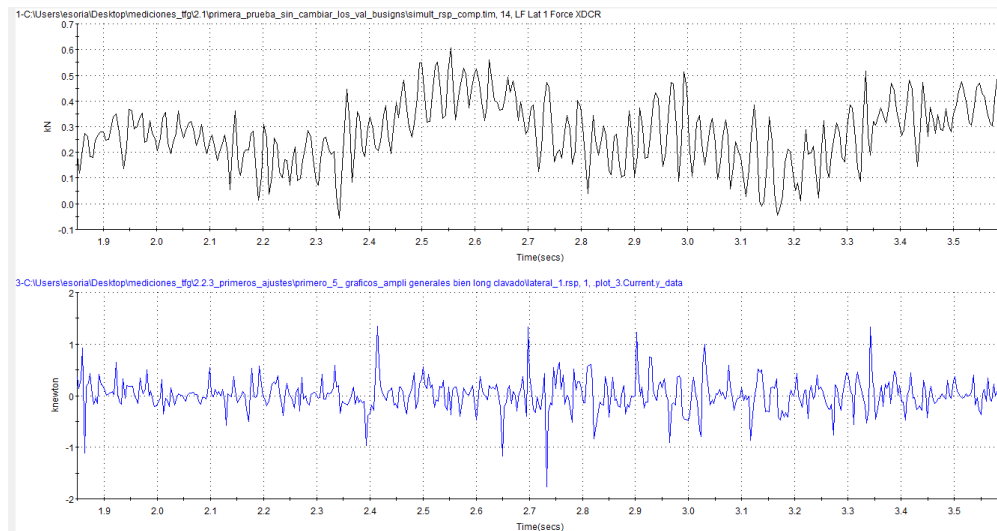
amplitud de pico a pico modelo	0.769 kN	1.429 kN	1.345 kN
amplitud de pico a pico experimental	0.939 kN	1.337 kN	1.090 kN
diferencia	0.170 kN	0.092 kN	0.255 kN

Analizando los resultados se observa que la diferencia entre las amplitudes de las fuerzas longitudinales medidas por las células de carga no sería admisible al

tener un error relativo en torno al 42%, no obstante, al estar en una primera iteración se da por válido este error. Por otro lado, también se aprecia un desfase despreciable. Por lo tanto, se da este ajuste por válido para la fuerza longitudinal

#### 9.4.2. Lateral 1

A continuación, se compararán los valores experimentales de las fuerzas medidas por la célula de carga lateral 1 y los nuevos valores de las fuerzas laterales 1 del modelo.

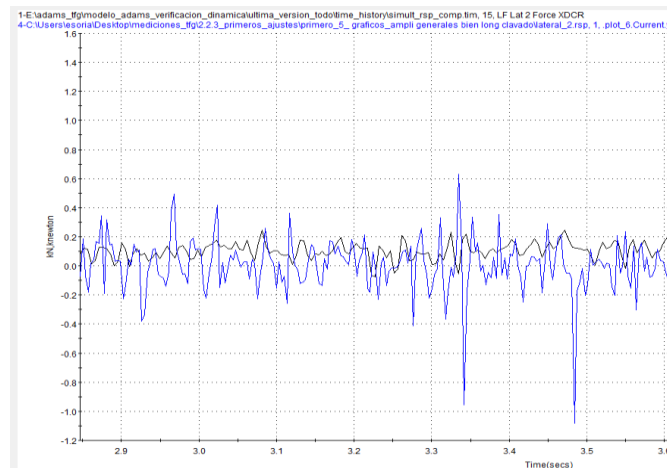


*Ilustración 44 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas laterales 1 en la primera iteración, FUENTE: RPC*

En la primera aproximación se observa, por una parte, que la medición del modelo no tiene la misma forma que la medición experimental, y por otra parte, que la medición del modelo tiene más ruido que la experimental. Aun así, teniendo en cuenta el offset de 0.3 kN, la medición del modelo sí que estaría dentro de un rango de amplitudes aceptables. No obstante, esta medida sí requiere una mayor calibración con el objetivo principal de conseguir la forma de la señal experimental.

#### 9.4.3. Lateral 2

A continuación, se compararán los valores experimentales de las fuerzas medidas por la célula de carga lateral 2 y los nuevos valores de las fuerzas laterales 2 del modelo.

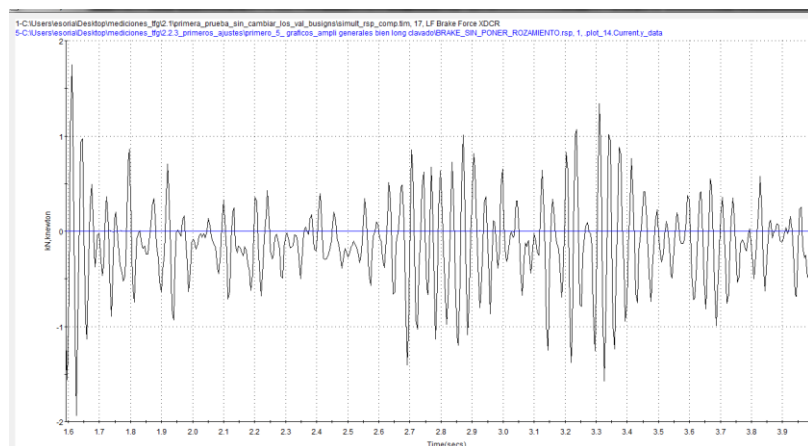


*Ilustración 45 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas laterales 2 en la primera iteración, FUENTE: RPC*

En la primera aproximación se observa, nuevamente, que la medición realizada por el modelo tiene más ruido que la experimental. En cuanto a las amplitudes, no han sufrido variaciones importantes respecto a las obtenidas en la primera simulación. Por lo tanto, sigue siendo necesario calibrar esta medición con el fin de reducir la amplitud de esta.

#### 9.4.4. Brake

A continuación, se compararán los valores experimentales de las fuerzas medidas por la célula de carga brake y los nuevos valores de las fuerzas brakes del modelo.



*Ilustración 46 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas de brake en la primera iteración, FUENTE: RPC*

En el caso en la medición de brake, no ha habido ninguna variación con respecto a la primera simulación. Por lo tanto, se llega a la conclusión de que los parámetros axiales de los dos bushings no tiene gran influencia en la medición de la célula de carga de brake. De manera que para ajustar esta medición será necesario

ajustar otros parámetros del modelo. En consecuencia, se decide centrarse en calibrar esta medida en la siguiente iteración al ser la que peor resultados ha tenido.

### 9.5. Modelo de 2 bushings: Segunda iteración

Como ya se ha mencionado, en esta segunda iteración se decide centrarse en la medición de brake. Por consiguiente, se busca conseguir un aumento considerable de la amplitud de esta medición, además de lograr una forma lo más similar a la experimental. Todo ello debido a la influencia en estos dos factores en la simulación de fatiga de los componentes. Para ello se plantean varias posibles soluciones.

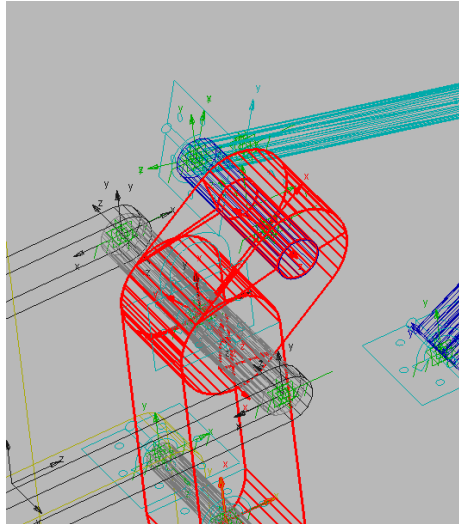
La primera opción que se prueba consiste en modificar la inercia, y con ella la fuerza percibida del reenvío brake al cual se transmite el movimiento del actuador de brake. Aunque con esta opción se consigue aumentar la amplitud de la señal, para ello se requiere aumentar la inercia de la pieza 100 veces. Por lo tanto, esta opción no es viable al haber obtenido la geometría del reenvío mediante planos del simulador.

La segunda opción que se intenta consiste en cambiar la posición y la inclinación del actuador que genera los movimientos de brake. Regulando la inclinación del actuador se modifica la fuerza axial medida por la célula, ya que, se cambia el ángulo entre el suelo y el actuador. Sin embargo, no se consigue un aumento relevante en la amplitud de la medición.

La tercera opción que se prueba es sustituir el joint cilíndrico por un bushing, con el cual ajustar la medición modificando sus componentes de rigidez y de amortiguamiento. Aunque se consigue un resultado óptimo, permitiendo aproximar la medida tanto en forma como en amplitud a la experimental, se descarta en favor de la última opción, ya que, al introducir un bushings se estaría añadiendo más parámetros innecesarios que calibrar.

La cuarta opción que se prueba consiste en la sustitución de joint cilindro por un contacto entre dos piezas en el cual se modela un rozamiento. Esta opción se plantea al haber la posibilidad de que el rozamiento existente en esta unión se mayor que en las demás uniones, ya que, con el movimiento de este reenvío se mueven gran cantidad de componentes del simulador, y por lo tanto los efectos de las fuerzas y de los momentos generados pueden llegar a ser mayores.

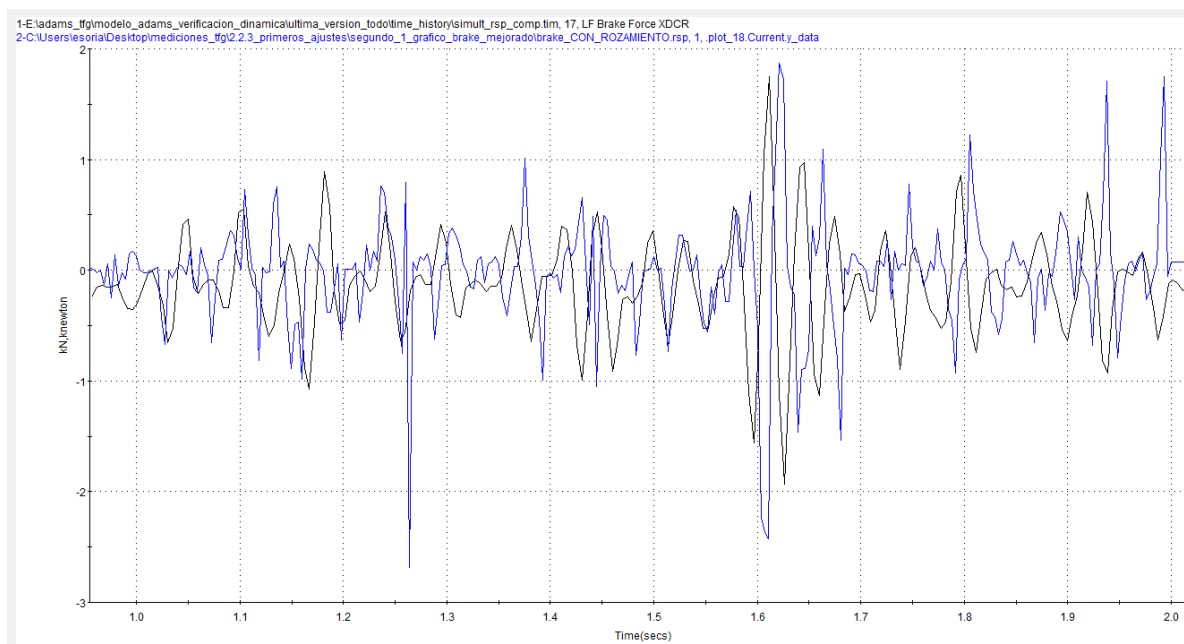
Para poder realizar esta prueba primero se modifica el modelo introduciendo un agujero en el reenvío de brake y pasando por él una barra, para posteriormente introducir el contacto entre la superficie ambas superficies.



*Ilustración 47 Introducción de un contacto en el reenvío de brake, FUENTE: ADAMS*

Al final, se elige la opción del rozamiento, ya que, permite realizar un ajuste similar a la opción del bushings pero sin aumentar demasiado el número de parámetros a calibrar.

Este es el resultado final y su análisis:



*Ilustración 48 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas de brake en la segunda iteración, FUENTE: RPC*

Primero se realiza una primera comprobación, en la cual se puede observar una mejora sustancial en la medición, teniendo amplitudes muy similares a la experimental, al mismo tiempo que se reduce el desfase, incluso teniendo instantes en los que los picos de ambas mediciones coinciden perfectamente.

A continuación, se realiza una verificación de las amplitudes y de la forma más detallada, en el intervalo de la imagen. Para ello, se decide calcular nuevamente la media de ambas señales y el periodo de un intervalo concreto. Asimismo, para comprobar más en detalle la diferencia de amplitudes se calcula la amplitud pico a pico de ambas señales en varios puntos de un intervalo, de esta manera se pretende observar con mayor atención el efecto del contacto con rozamiento.

valor medio modelo	-0.019 kN
valor medio experimental	-0.012 kN
diferencia	0.006 kN

periodo modelo	0.024 s
periodo experimental	0.029 s
diferencia	0.005 s

amplitud de pico a pico modelo	2.422 kN	2.765 kN	2.632 kN
amplitud de pico a pico experimental	2.041 kN	3.682 kN	2.102 kN
diferencia	0.381 kN	0.917 kN	0.530 kN

En conclusión, se puede apreciar una mejora considerable de las amplitudes de la señal del modelo, aunque el error relativo de la media está en torno al 50 %, debido a la existencia de picos de mayor amplitud en la medición del modelo, si se observa el error relativo cometido en las amplitudes de pico a pico se ve que el error real está en torno al 23 %. Por otro lado, nuevamente se tiene un desfase despreciable entre ambas señales. Además, se observa una escasa influencia del contacto en las demás medidas, lo cual facilita la calibración del modelo. Por todo ello se da por válida la calibración de la medición de la célula de carga de brake.

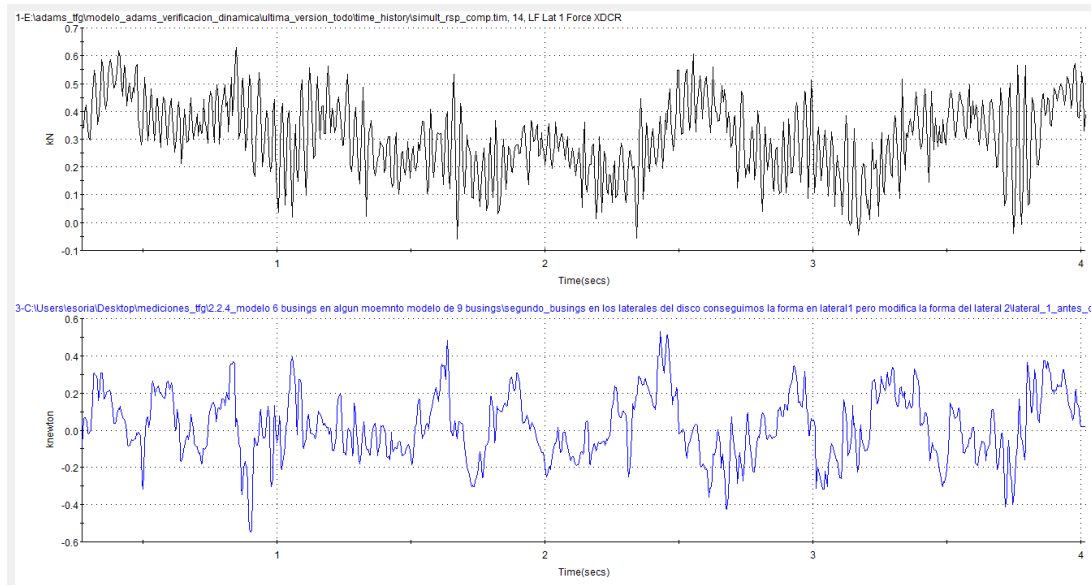
### 9.6. Modelo de 2 bushings: tercera iteración

Una vez calibrado el brake se procede a hacer la tercera iteración, con la cual se busca conseguir replicar la forma de la medición experimental del lateral 1 y del lateral 3, y una vez se logre se buscará mejorar las amplitudes de ambas mediciones. Para ello se plantean diferentes soluciones.

La primera opción que se plantea es introducir un contacto en sustitución del joint cilíndrico que une el reenvío del lateral 1 y su actuador. Para poder introducir este contacto se realiza una modificación similar a la realizada en la anterior iteración, y se ajustan los parámetros del rozamiento en busca de conseguir la forma deseada. Sin embargo, no se consigue ninguna mejora.

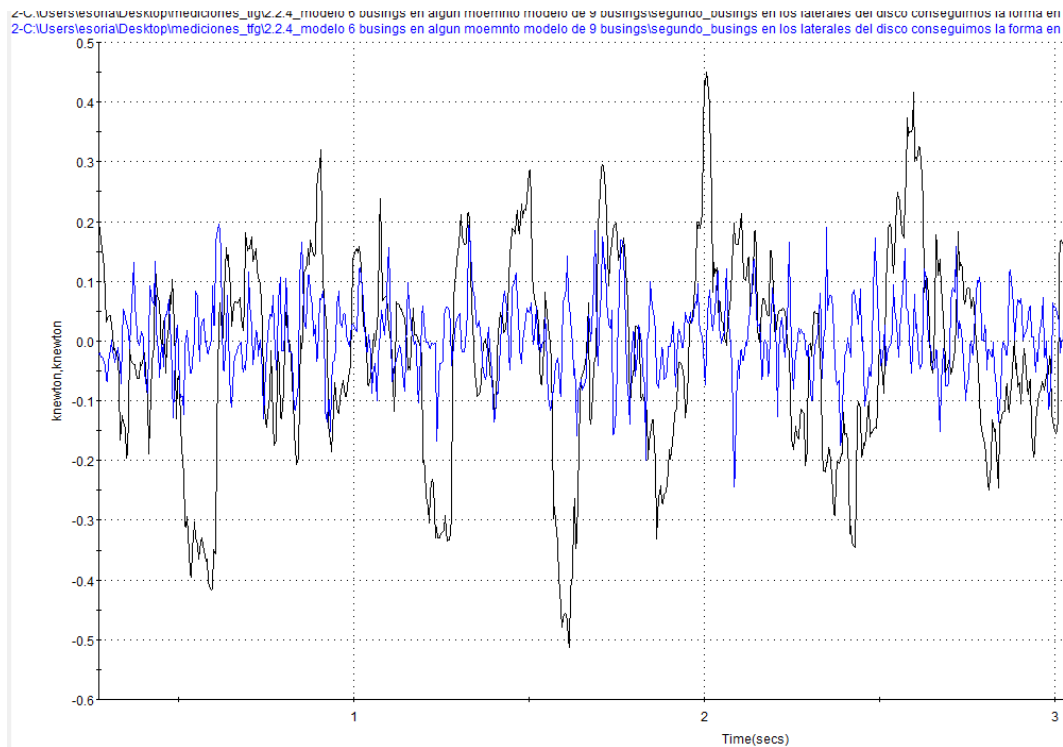
La segunda opción que se plantea es colocar bushings entre los struts verticales y el Swift y ajustar sus parámetros de rigidez y amortiguamiento a torsión,

ya que, es una de las uniones donde más giros se realizan. Como resultado del uso de estos bushings se consigue que el lateral 1 empiece a tener la forma deseada, sin embargo, se modifica la forma de la medición del lateral 2. Por ello, se descarta esta opción.



*Ilustración 49 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas laterales 1 en la tercera iteración, FUENTE: RPC*

Aquí se puede ver que, aunque no es exactamente igual, sí que empieza a aparecer la tendencia que tiene en la medición experimental.

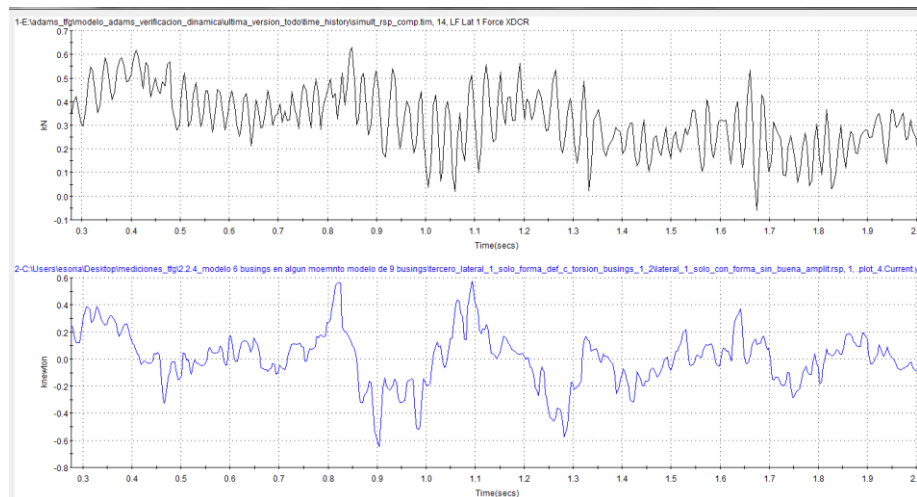


*Ilustración 50 Comparación de las amplitudes y el desfase de las fuerzas laterales 2 en la tercera iteración, FUENTE: RPC*



En esta imagen se puede apreciar como los nuevos bushings han otorgado a la medición de la lateral 2 una tendencia que en la realidad no se da.

La tercera opción que se plantea nace como sustitución de la opción anterior, en la cual se ha observado que la causa de la forma o tendencia de la medición del lateral 1 y 3 son la rigidez y amortiguamiento a torsión, sobre todo por el amortiguamiento a torsión. Es por esto, que la tercera opción consiste en buscar valores de amortiguamiento a torsión de los dos primeros bushings del modelo que puedan generar esa tendencia sin modificar la medición del lateral 2.



*Ilustración 51 Resultados de la tercera opción en la medición de fuerzas laterales 1, FUENTE: RPC*

En esta imagen se puede apreciar cómo, aunque algo desfasada, la medición del modelo tiende a replicar la misma forma, con subidas y bajas, que la medición experimental.

La última opción que se plantea consiste en colocar un bushing en sustitución a joint esférico que une el reenvío de lateral con el strut lateral y mediante iteraciones buscar los valores óptimos con los que conseguir replicar la tendencia de las mediciones del lateral 1 y lateral 3 sin modificar la medición del lateral 2. Sin embargo, no se consigue. No obstante, se observa que por medio de estos bushings se consigue controlar de una forma más exacta la amplitud y la frecuencia de las mediciones.

Por todo ello, en este caso se decide efectuar al mismo tiempo las dos últimas opciones planteadas. De esta manera se consigue que las mediciones del lateral 1 y del lateral 3 tengan la forma deseada y al mismo tiempo se facilitan las calibraciones de las demás mediciones añadiendo los bushing, quedando un modelo final con 6 bushings.

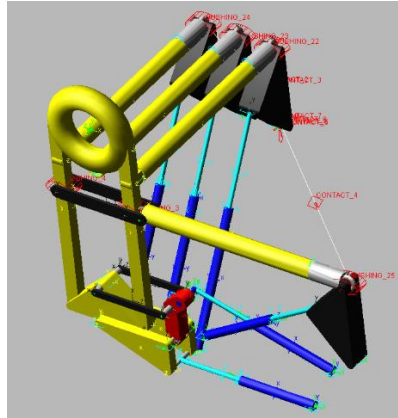


Ilustración 52 Nuevo modelo con 6 bushings, FUENTE: ADAMS

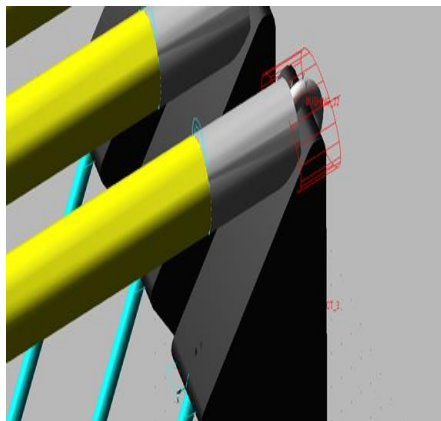


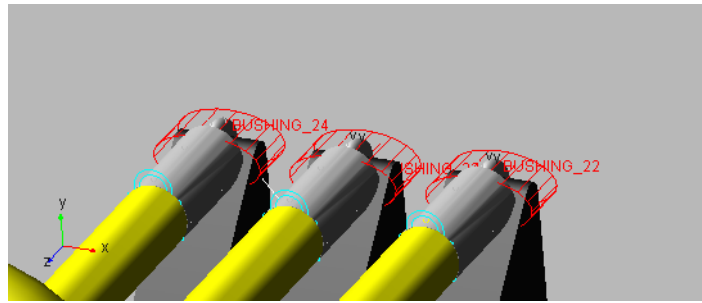
Ilustración 53 Posición de los nuevos bushings, FUENTE: ADAMS

### 9.7. Modelo de 6 bushings: cuarta iteración

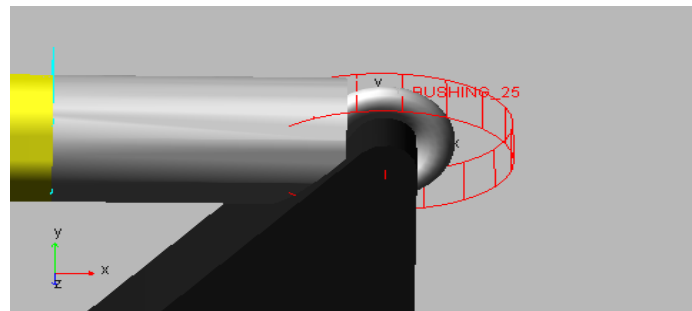
Una vez se tienen todas las herramientas para poder calibrar y ajustar las distintas medidas por separado se hace una cuarta iteración. En esta se busca obtener mediciones más cercanas a la experimentales. Para ello se tiene en cuenta la influencia de los distintos componentes de cada bushing en las distintas células de carga. De manera que se puedan iterar los componentes que mayor efecto tengan en cada medición afectando lo mínimo posible a las demás mediciones.

#### 9.7.1. Ajuste de la medición longitudinal

Lo primero que se ajusta son las amplitudes de la medición longitudinal, ya que, muchos de los componentes de los diferentes bushings del modelo afectan a esta medición. Para ello, primero se iteran los amortiguamientos de los componentes equivalentes a la dirección X de las coordenadas generales del modelo de todos los bushings excepto los componentes de los primeros bushings modelados. Estos no se modifican al haber conseguido con ellos unas amplitudes y formas de las mediciones bastante próximas a las experimentales, por lo tanto, ahora se busca mejorar estas mediciones mediante el ajuste de los demás bushings.

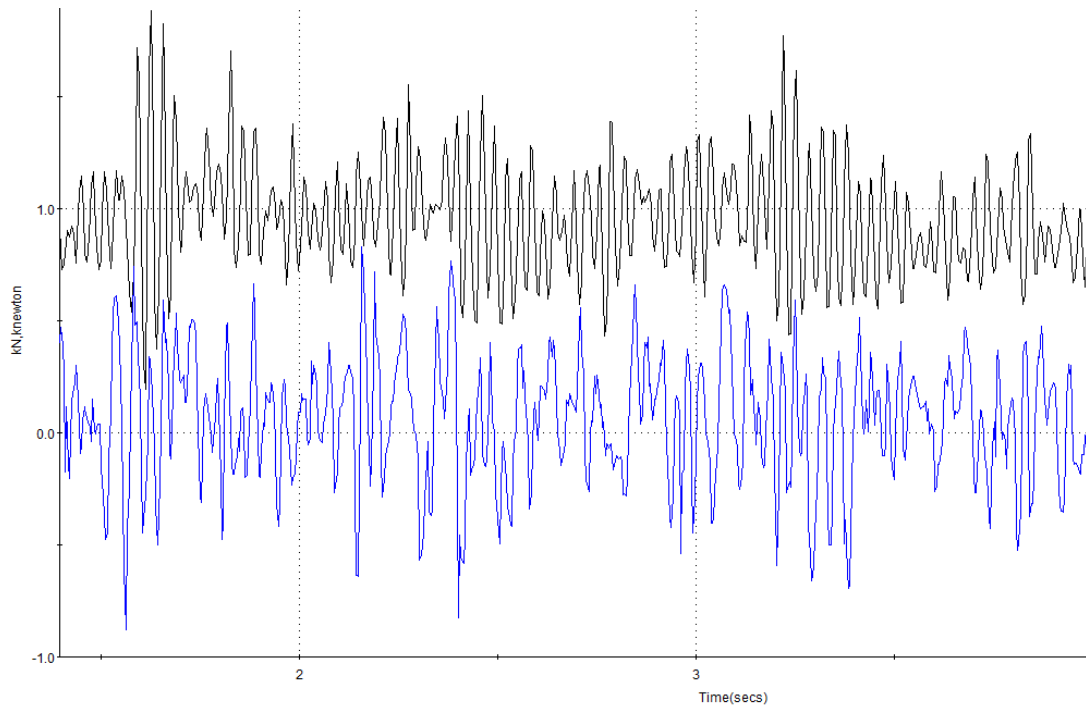


*Ilustración 54 Bushings laterales modificados con las coordenadas generales, FUENTE: ADAMS*

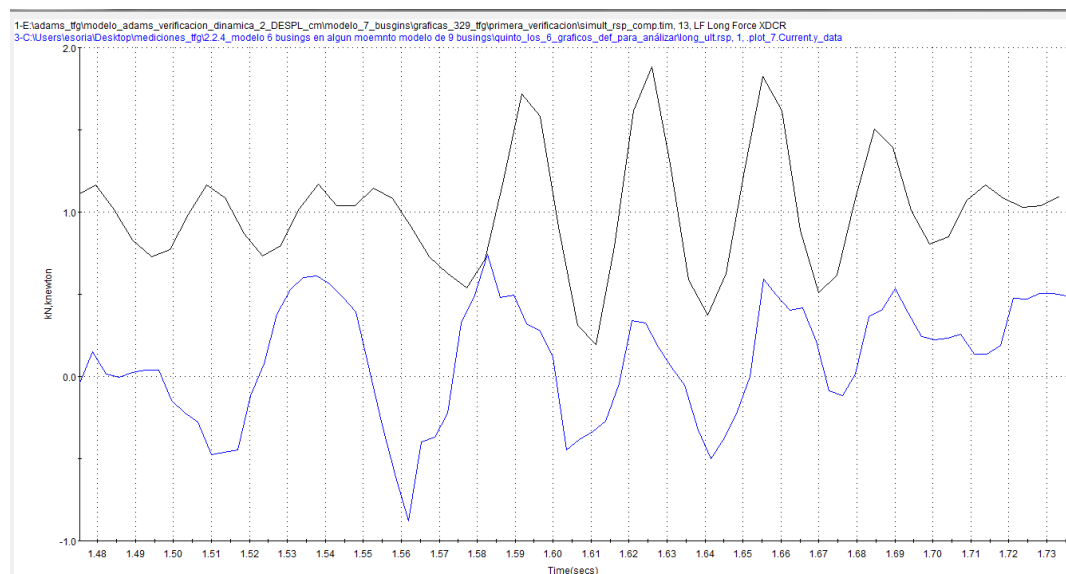


*Ilustración 55 Bushing longitudinal modificado con las coordenadas generales, FUENTE: ADAMS*

Una vez obtenido el amortiguamiento óptimo se procede a ajustar los distintos valores de rigidez de las mismas direcciones de estos bushings. El resultado final es el siguiente.



*Ilustración 56 Comprobación de las amplitudes de las fuerzas longitudinales en la cuarta iteración, FUENTE: RPC*



*Ilustración 57 Comprobación del desfase de las fuerzas longitudinales en la cuarta iteración, FUENTE: RPC*

A continuación, se procede a analizar los resultados comparándolos con la medición experimental. Para esto, se calcula nuevamente la media de ambas señales y el periodo de un intervalo concreto. Asimismo, para comprobar más en detalle la diferencia de amplitudes se calcula la amplitud pico a pico de ambas señales en varios puntos de un intervalo.

valor medio modelo	0.056 kN
valor medio experimental	-0.043 kN
diferencia	0.013 kN

periodo modelo	0.038 s
periodo experimental	0.034 s
diferencia	0.004 s

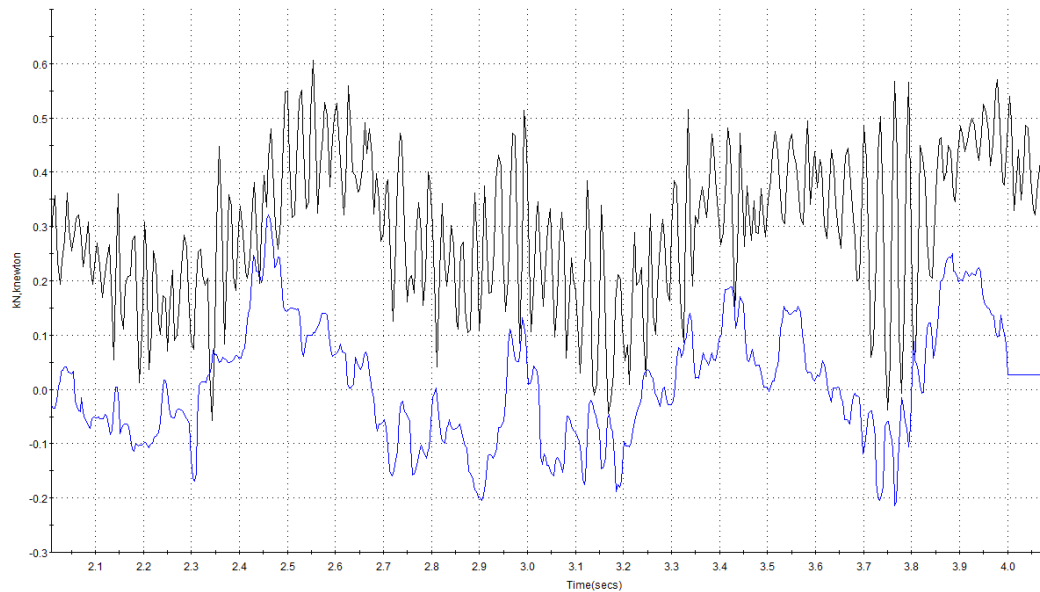
amplitud de pico a pico modelo	0.440 kN	0.470 kN	0.733 kN
amplitud de pico a pico experimental	0.542 kN	0.337 kN	0.661 kN
diferencia	0.102 kN	0.132 kN	0.072 kN

En conclusión, se puede apreciar cierta mejora en las amplitudes con respecto a la anterior calibración longitudinal realizada al modelo, no obstante, se sigue teniendo un error relativo elevado, el cual está en torno al 30 %. La causa de este error puede ser debida algún pico mal reproducido al ser la diferencia de las medias de solo 13 N. Por otro lado, también se da una mejora en el desfase que se da entre ambas señales. Por todo ello se da por válida esta calibración de la fuerza longitudinal.

#### 9.7.2. Ajuste de la medición del lateral 1 y 3

Las segundas mediciones que se ajustan son las correspondientes al lateral 1 y al lateral 3, las encargadas de generar los movimientos de cambio de dirección. En este caso únicamente se iteran los componentes equivalentes a las direcciones Z e Y de las coordenadas generales del modelo de los bushings colocados en los reenvíos lateral 1 y lateral 2. Primero se ajusta el valor del amortiguamiento de los componentes y una vez obtenidos se realiza el mismo proceso de iteración para la rigidez.

A continuación, se procede analizar los resultados de la medición del lateral 1 comparando nuevamente la media de las señales, el periodo de un intervalo concreto y la diferencia de las amplitudes de pico a pico de un intervalo.



*Ilustración 58 Comprobación del desfase y de las amplitudes de las fuerzas laterales 1 en la cuarta iteración, FUENTE: RPC*

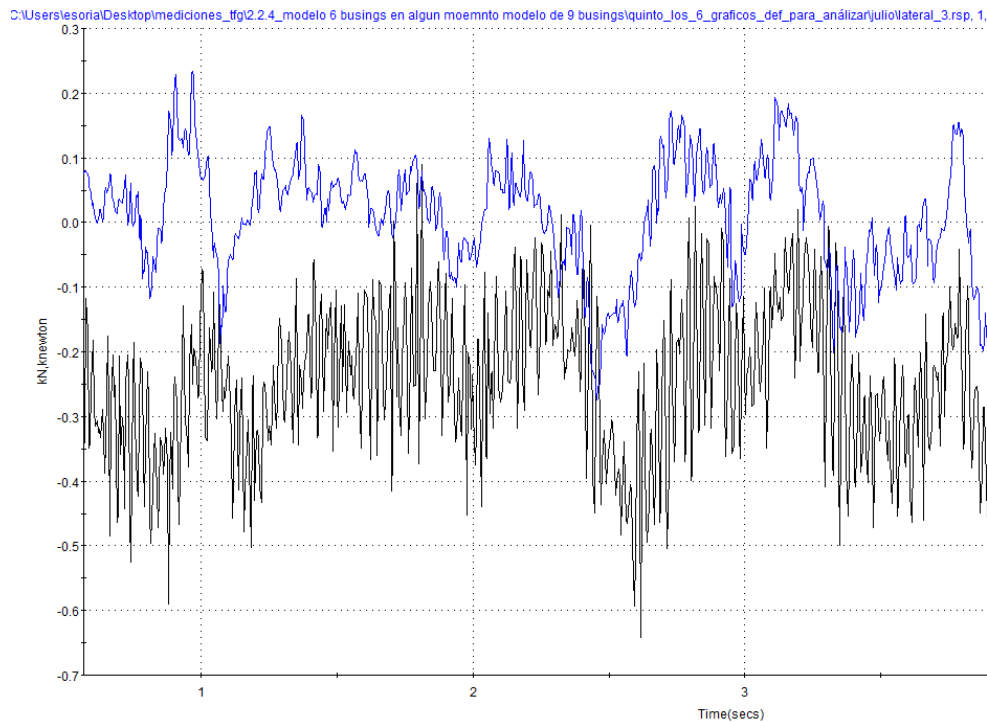
valor medio modelo	-0.022 kN
valor medio experimental	0.024 kN
diferencia	0.002 kN

periodo modelo	0.528 s
periodo experimental	0.439 s
diferencia	0.089 s

amplitud de pico a pico modelo	0.451 kN	0.618 kN	0.353 kN
amplitud de pico a pico experimental	0.565 kN	0.690 kN	0.673 kN
diferencia	0.114 kN	0.072 kN	0.320 kN

En esta medición los tres puntos a analizar son nuevamente las amplitudes, el desfase y la forma o tendencia de la señal. En cuanto a la amplitud, se observa que la diferencia de amplitudes entre el modelo y el simulador está dentro de un rango aceptable con error relativo que está en torno al 8 %. Asimismo, el desfase que se tiene en esta medición, aun siendo más gran de que los anteriores ajustes, también está dentro de un rango aceptable. Por último, en cuanto a la forma, se puede observar que las fuerzas que capta el modelo en el lateral 1 siguen la misma tendencia que la experimental, aunque es cierto que en la medición del modelo se tiene más ruido, lo cual elimina algunos picos. Por todo ello, se da por válido este ajuste.

Una vez analizada la medición del lateral 1 se procede a analizar la medición del lateral 3, para comprobar si esta medición también se ajusta a las exigencias establecidas.



*Ilustración 59 Comprobación del desfase y de las amplitudes de las fuerzas laterales 3 en la cuarta iteración, FUENTE: RPC*

valor medio modelo	0.025 kN
valor medio experimental	-0.026 kN
diferencia	0.001 kN

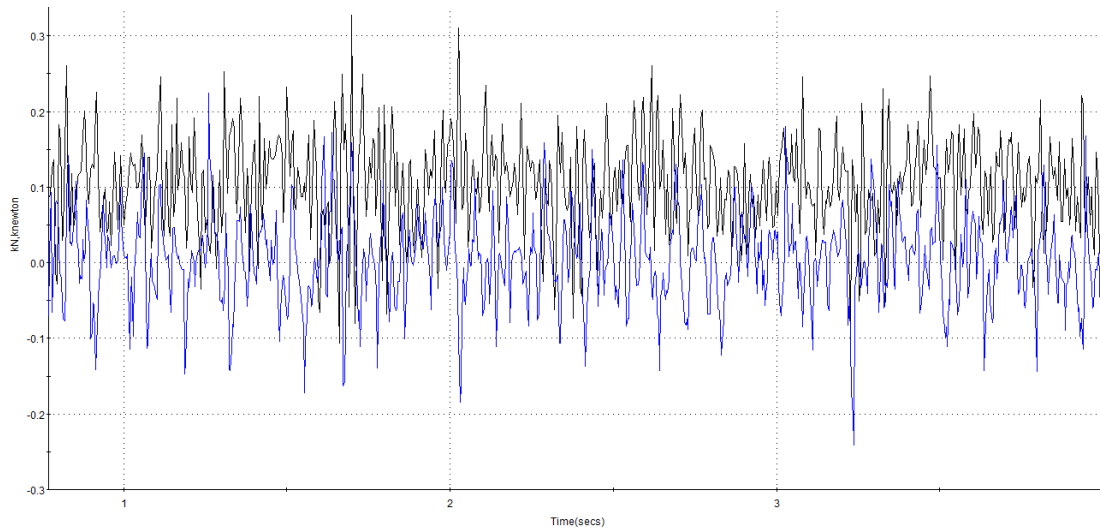
periodo modelo	0.385 s
periodo experimental	0.371 s
diferencia	0.014 s

amplitud de pico a pico modelo	0.292 kN	0.293 kN	0.272 kN
amplitud de pico a pico experimental	0.387 kN	0.390 kN	0.394 kN
diferencia	0.095 kN	0.097 kN	0.122 kN

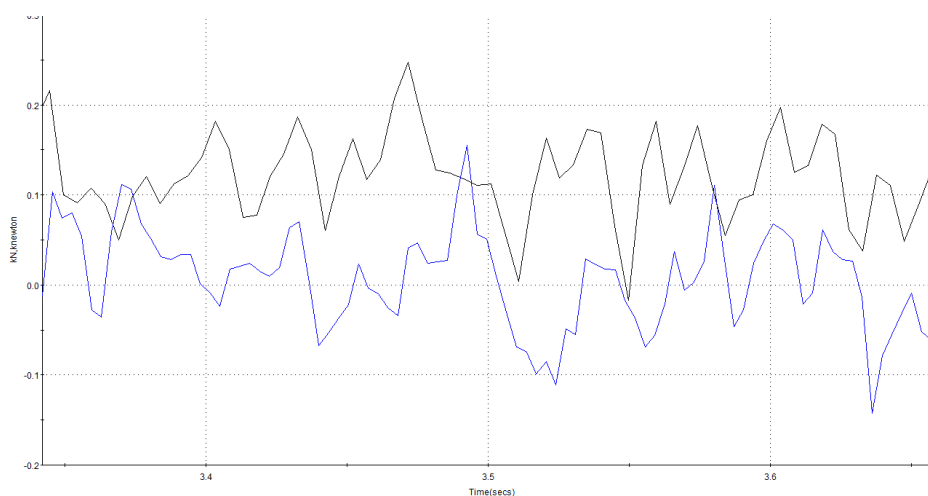
En esta medición se analizan nuevamente los mismos tres puntos. En cuanto a la amplitud, se observa que la diferencia de amplitudes entre el modelo y el simulador está dentro de un rango aceptable con un error relativo en la media bastante pequeño, el cual está en torno al 4 %. Asimismo, el desfase que se tiene en esta medición es despreciable y menor al dado en la medición del lateral 1, esto puede deberse a un distinto funcionamiento entre los bushings del lateral 1 y del lateral 3 por un distinto mantenimiento. Además, la medición del modelo también sigue la tendencia o forma de la señal del simulador, tal y como lo hace la medición del lateral 1. Por lo tanto, la medición de las fuerzas en la célula de carga del lateral 3 se da por válida.

### 9.7.3. Ajuste de la medición del lateral 2

La tercera medición que se ajusta es la correspondiente al lateral 2, la encargada de generar los movimientos de camber de la rueda de un vehículo. Como en el caso anterior se iteran los componentes equivalentes a las direcciones Z e Y de las coordenadas generales del modelo del bushing situado en el reenvío lateral 2. Primero se ajustan los valores del amortiguamiento de los componentes y una vez obtenidos se realiza el mismo proceso de iteración para la rigidez.



*Ilustración 60 Comprobación de las amplitudes de las fuerzas laterales 2 en la cuarta iteración, FUENTE: RPC*



*Ilustración 61 Comprobación del desfase de las fuerzas laterales 2 en la cuarta iteración, FUENTE: RPC*



Nuevamente se analiza la medición del modelo y la experimental. Para ello, una vez más se hace un análisis de la media de las señales, el periodo de un intervalo concreto y la diferencia de las amplitudes de pico a pico de un intervalo.

valor medio modelo	0.021 kN
valor medio experimental	0.019 kN
diferencia	0.002 kN

periodo modelo	0.042 s
periodo experimental	0.049 s
diferencia	0.007 s

amplitud de pico a pico modelo	0.266 kN	0.097 kN	0.324 kN
amplitud de pico a pico experimental	0.180 kN	0.186 kN	0.230 kN
diferencia	0.086 kN	0.088 kN	0.094 kN

Analizando los resultados se observa que el error que se comete en cuanto a la diferencia de amplitudes es pequeña, teniendo un error relativo en la media que está en torno al 11 %, al igual que el desfase que se da entre ambas señales. Por consiguiente, se da por válido el ajuste de la medición de la fuerza del lateral 2.

#### 9.7.4. Ajuste de la medición de brake

Por último, se ajusta la medición de brake al ser esta la que menos afecta a las demás mediciones. Para esto se realiza un proceso de iteración con el cual se busca el valor óptimo del coeficiente de rozamiento estático y sobre todo del dinámico.

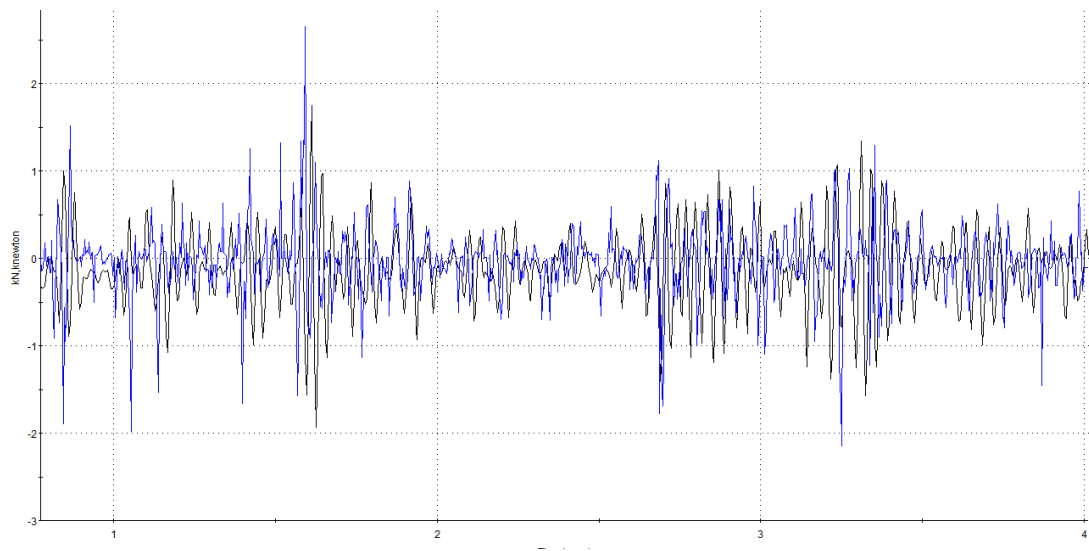


Ilustración 62 Comprobación de las amplitudes de las fuerzas de brake en la cuarta iteración, FUENTE: RPC

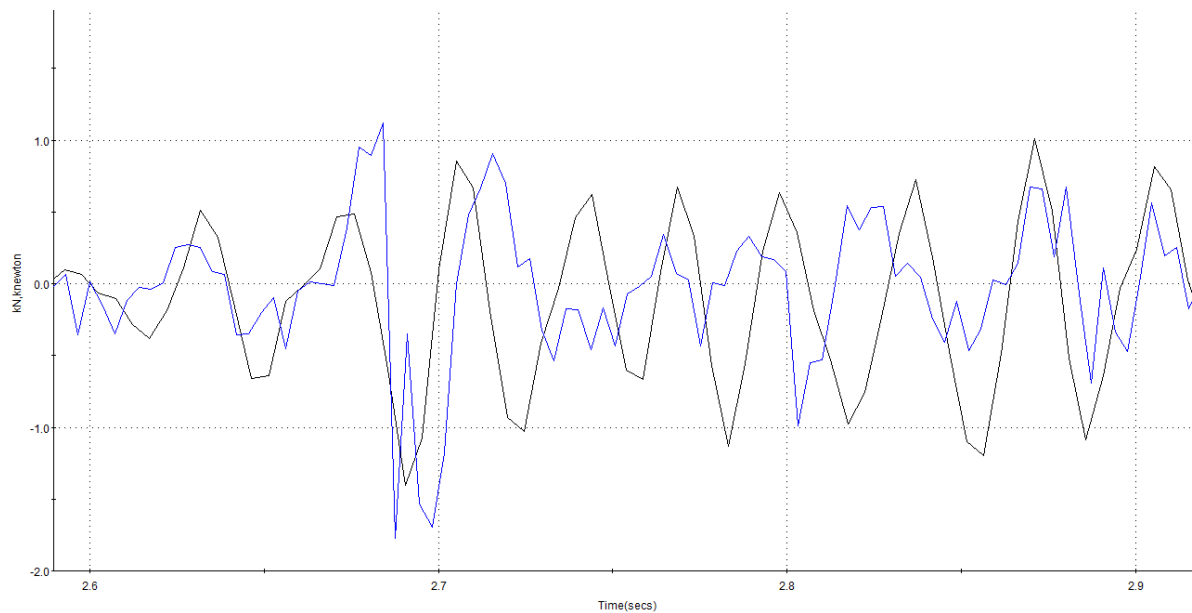


Ilustración 63 Comprobación del desfase de las fuerzas de brake en la cuarta iteración, FUENTE: RPC

Nuevamente se analiza la medición del modelo y la experimental. Para ello, se hace un análisis de la media de las señales, el periodo de un intervalo concreto y la diferencia de las amplitudes de pico a pico de un intervalo.

valor medio modelo	-0.018 kN
valor medio experimental	-0.012 kN
diferencia	0.005 kN

periodo modelo	0.031 s
periodo experimental	0.029 s
diferencia	0.002 s

amplitud de pico a pico modelo	0.730 kN	1.469 kN	1.319 kN
amplitud de pico a pico experimental	1.167 kN	1.893 kN	1.612 kN
diferencia	0.438 kN	0.423 kN	0.293 kN

Analizando los resultados se observa nuevamente que debido a algunos picos mal reproducidos el error relativo de la media es alto, aunque se ha conseguido reducir respecto al anterior estando cerca del límite admisible. No obstante, si nos fijamos en el error cometido en las amplitudes pico a pico se ve que el error real está en torno al 25 %, un poco peor que en el anterior en la segunda calibración, pero dentro de los límites admisibles. Por otro lado, se ha conseguido reducir el desfase entre las señales. Por consiguiente, se da por válido el ajuste de la medición de la fuerza del brake.

## 9.8. Conclusión

En conclusión, de la primera adquisición se logra obtener un modelo que reproduce las fuerzas del simulador con bastante exactitud. Además, se consigue determinar la cantidad y la ubicación de los bushings del simulador e identificar qué parámetros de estos son los de mayor influencia para cada medición. Sin embargo, no se tiene información sobre cómo han afectado las modificaciones del modelo en el comportamiento cinemático.

## 10. VERIFICACIÓN DINÁMICA: SEGUNDA ADQUISICIÓN

Una vez se ajustó el modelo a la primera adquisición, se plantea realizar una nueva adquisición con el fin de verificar la empleabilidad del modelo, y de este modo garantizar que se pueda emplear en sustitución o como apoyo a las simulaciones reales. Asimismo, se busca comprobar si los cambios realizados han afectado positivamente al comportamiento cinemático. Por lo tanto, en esta segunda adquisición se recogen los datos de las mediciones de las células de carga y los desplazamientos del centro del Swift.

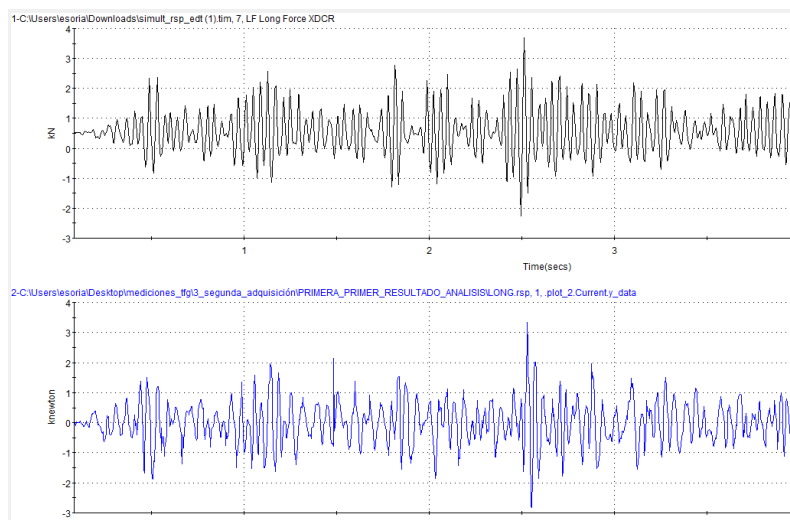
Para obtener los datos necesarios se sigue el mismo procedimiento empleado en la primera adquisición, en el cual se realiza la adquisición, nuevamente en vacío, y posteriormente se realiza un tratamiento a los datos para importarlos como inputs en el modelo.

## 10.1. Análisis resultados

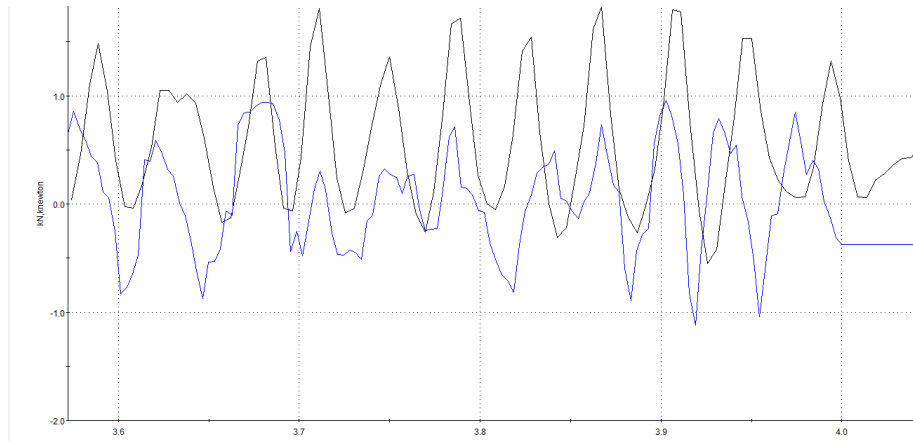
A continuación, se realiza una simulación de 4 segundos en los cuales se recogen las mediciones del modelo. Con estos primeros resultados, se realiza una primera comparación entre los resultados del modelo y los experimentales, con el fin de ver si la calibración realizada en la primera adquisición sigue siendo válida en esta segunda adquisición.

### 10.1.1. Longitudinal

A continuación, se hace una primera comparación de las mediciones de las fuerzas longitudinales del modelo y del simulador.



*Ilustración 64 Comparación de las amplitudes de las fuerzas longitudinales en la segunda adquisición,  
FUENTE: RPC*

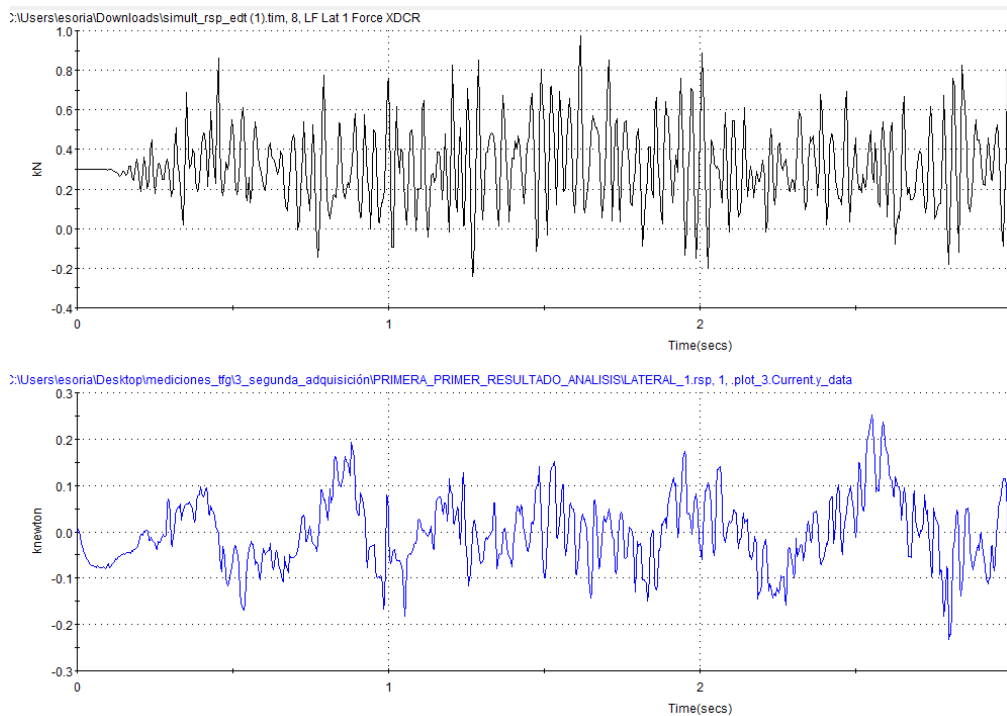


*Ilustración 65 Comparación del desfase de las fuerzas longitudinales en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

Analizando la medición longitudinal se puede observar que, en cuanto a la amplitud, teniendo en cuenta nuevamente el offset de 1 kN, la diferencia existente entre las amplitudes de ambas señales es pequeña. Además, se consigue una forma muy similar a la experimental con un desfase entre ambas señales despreciable. Por consiguiente, se da por válido la aproximación del modelo a la medición de la fuerza de la célula de carga longitudinal.

#### 10.1.2.Lateral 1

A continuación, se hace la comparación de las mediciones de las fuerzas laterales 1 del modelo y del simulador.

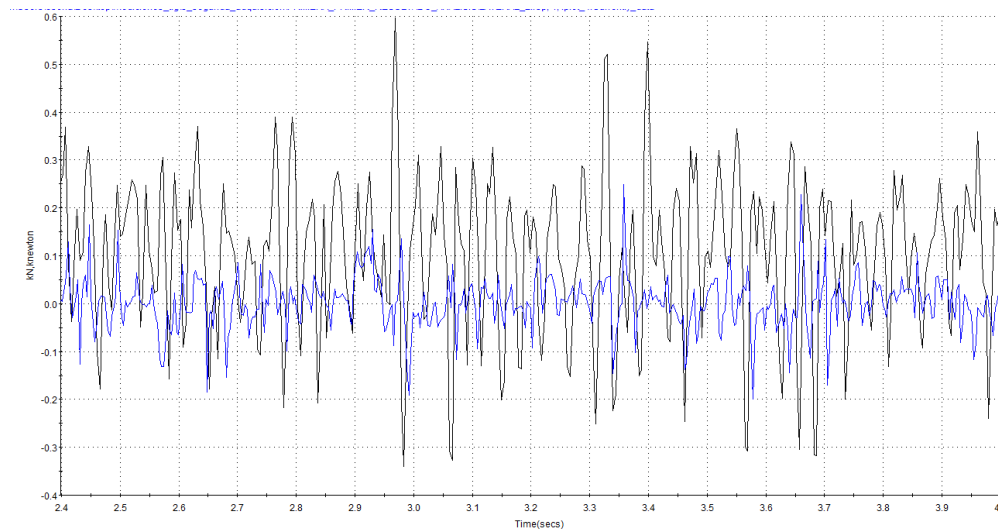


*Ilustración 66 Comparación de las amplitudes y de la forma de las fuerzas laterales 1 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

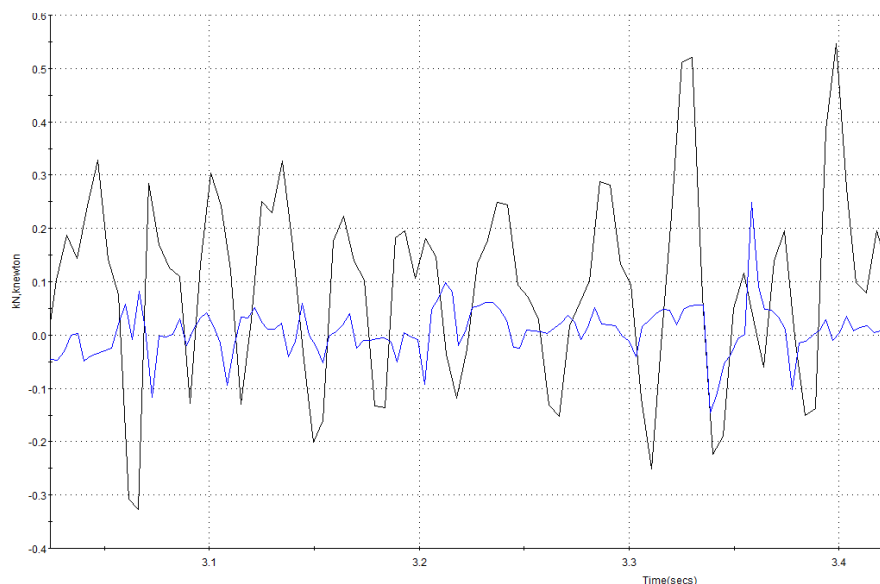
En cuanto a la medición del lateral 1, se puede observar una diferencia considerable entre la medición del modelo y la experimental. Esta diferencia se aprecia por un lado en la forma, ya que, mientras que el modelo reproduce una forma similar a la vista en la primera adquisición, en la medición experimental no se aprecia tal forma. Y por otro lado está la amplitud, aun teniendo en cuenta el offset, la amplitud de la medición es menor que la experimental, siendo esta diferencia elevada, en torno a 0.35 kN. Por ello, se aprecia que el modelo no consigue reproducir con acierto las fuerzas que se dan en la célula de carga del lateral 1 y por ende no se da por válida esta aproximación.

### 10.1.3.Lateral 2

Lo siguiente que se realiza es la comparación de las mediciones de las fuerzas laterales 2 del modelo y del simulador.



*Ilustración 67 Comparación de las amplitudes de las fuerzas laterales 2 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*



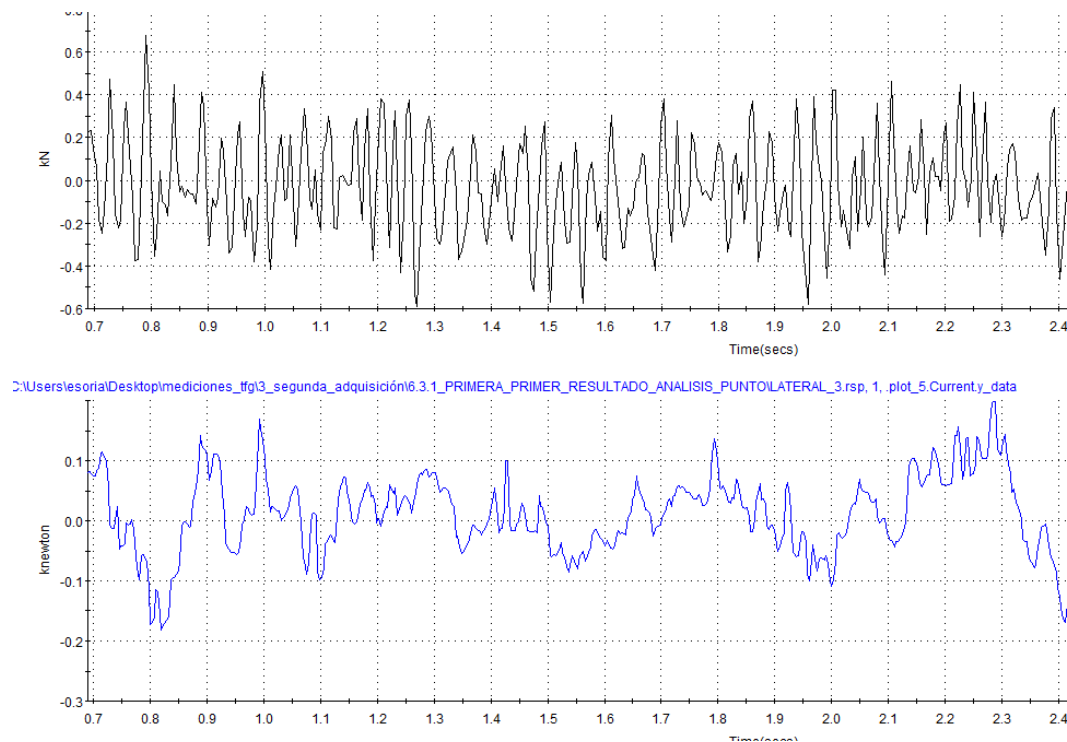
*Ilustración 68 Comparación del desfase de las fuerzas laterales 2 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

En cuanto a la medición del lateral 2, se puede observar nuevamente una diferencia considerable entre la medición del modelo y la experimental. Esta diferencia se aprecia principalmente en la amplitud de ambas mediciones, dándose una diferencia en torno a 0.4 kN. Por otro lado, en cuanto a la forma, se aprecia que

la medición del modelo tiene una forma similar a la experimental, aunque como ya se ha dicho, con una amplitud inferior. Por todo ello, se aprecia que el modelo no consigue reproducir con acierto las fuerzas que se dan en la célula de carga del lateral 2, por lo cual no se considera válida esta aproximación.

#### 10.1.4.Lateral 3

Seguidamente se hace la misma comparación, pero con las mediciones de las fuerzas laterales 3.



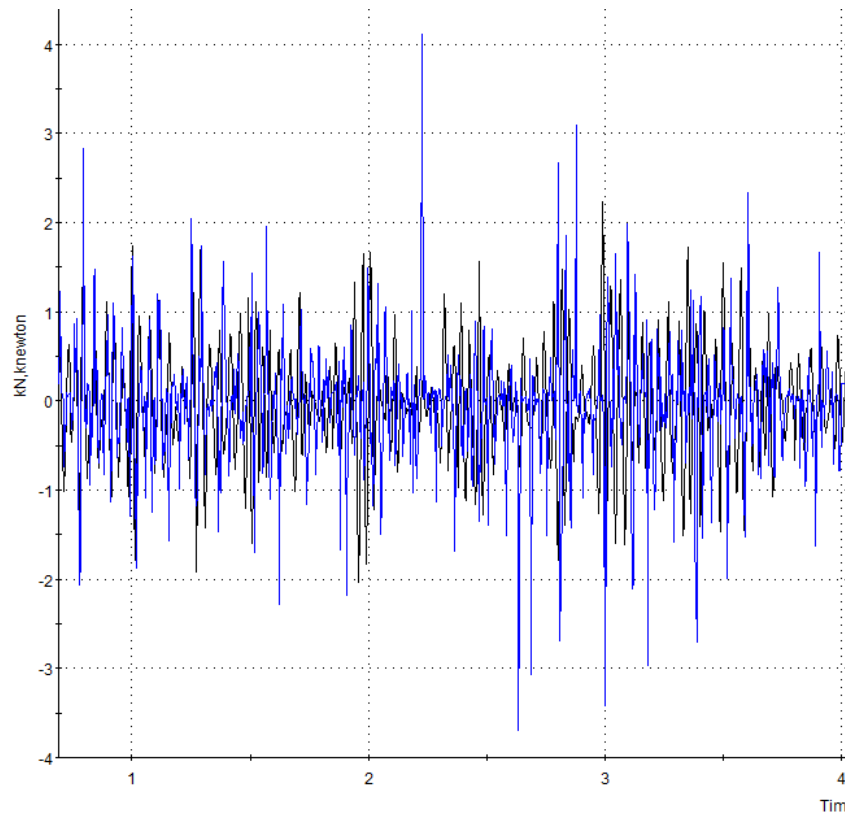
*Ilustración 69 Comparación de las amplitudes y de la forma de las fuerzas laterales 3 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

En cuanto a la medición del lateral 3, se observan nuevamente problemas parecidos a los ocurridos con la medición del lateral 1. Se da una diferencia de amplitudes importantes entre ambas señales, la cual está en torno a 0.4 kN, aun teniendo en cuenta el offset de la señal experimental. Asimismo, la forma de la medición del modelo no coincide con la experimental, tal y como ocurre con la medición del lateral 1, dándose una forma similar a la que tenía en la adquisición anterior. Por todo ello, se determina que el modelo no consigue reproducir con acierto las fuerzas que se dan en la célula de carga del lateral 3 y por ende no se da por válida esta aproximación.

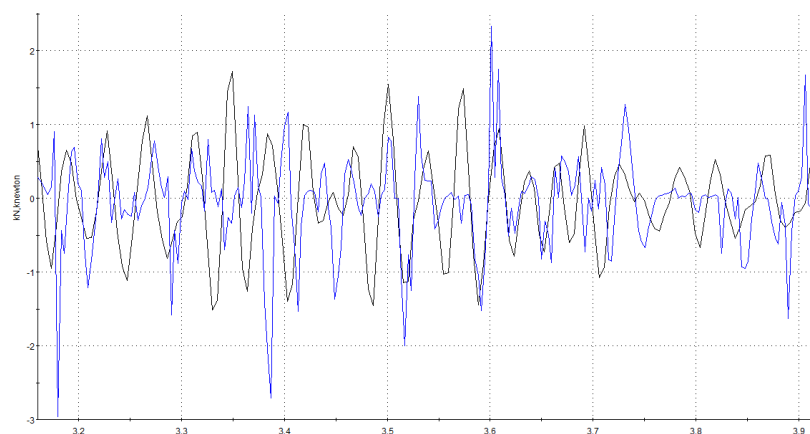


### 10.1.5.Brake

Por último, se hace la comparación de las mediciones de las fuerzas de brake del modelo y del simulador.



*Ilustración 70 Comparación de las amplitudes de las fuerzas de brake en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*



*Ilustración 71 Comparación del desfase de las fuerzas de brake en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

Por último, se analiza la medida del brake. Observando esta medición se aprecia que esta señal está mejor aproximada que las laterales analizadas anteriormente. Por un lado, la forma de la señal experimental está bastante lograda, teniendo un pequeño desfase entre ambas señales. Asimismo, la amplitud de la señal

experimental también está bastante aproximado, aunque se dan bastante picos altos que deben ser ajustados. Por consiguiente, se da por válido esta primera aproximación de la medición del brake, aunque se requiere un posterior ajuste.

## 10.2. Comparación de las adquisiciones

Posteriormente a la comparación de los resultados del modelo ante una nueva adquisición, en el cual se aprecia que el modelo no consigue reproducir de manera exitosa algunas señales, se busca una posible causa. Tras examinar y comprobar que ningún parámetro del modelo ha cambiado desde la realización del último ajuste, se decide comprobar los inputs en busca de alguna anomalía que pueda causar estos errores en las mediciones. Para ello, se decide comparar los desplazamientos de los actuadores de esta última adquisición con los desplazamientos de la primera adquisición, prestando especial atención al rango de los valores de sus desplazamientos.

### 10.2.1. Comparación de la adquisición longitudinal

A continuación, se realiza la comparación de las entradas del actuador longitudinal en la primera adquisición y en la segunda adquisición.

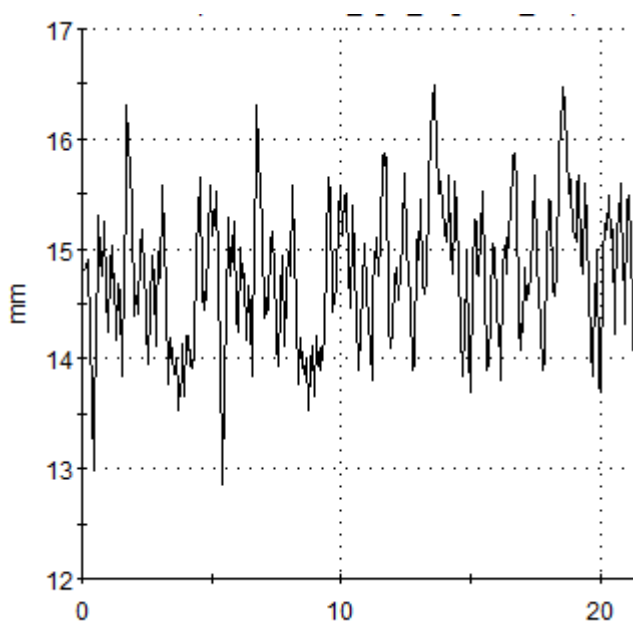


Ilustración 73 Entrada del actuador longitudinal en la primera adquisición, FUENTE: RPC

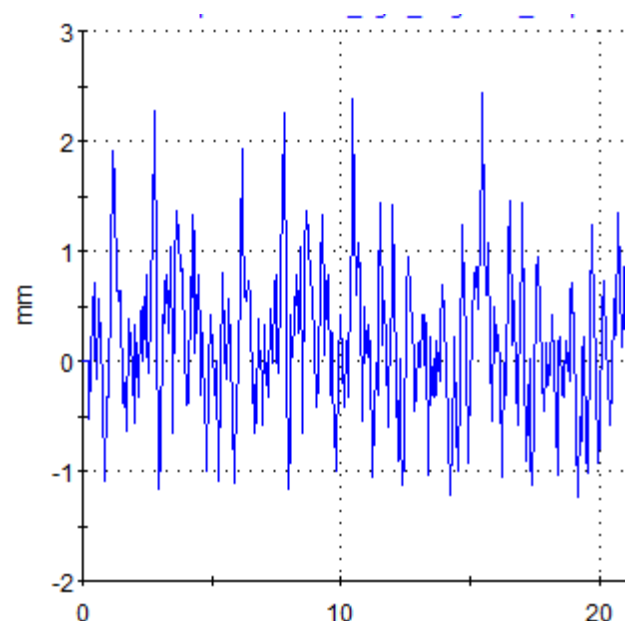


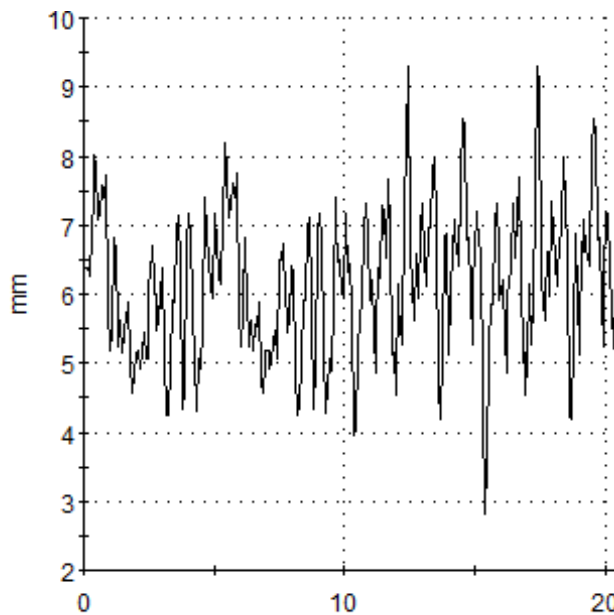
Ilustración 72 Entrada del actuador longitudinal en la segunda adquisición, FUENTE: RPC

Los desplazamientos de los actuadores longitudinales son los primeros que se analizan. Comparando los valores de ambas señales, teniendo en cuenta el offset de la primera adquisición, se observa que los desplazamientos en ambas señales están

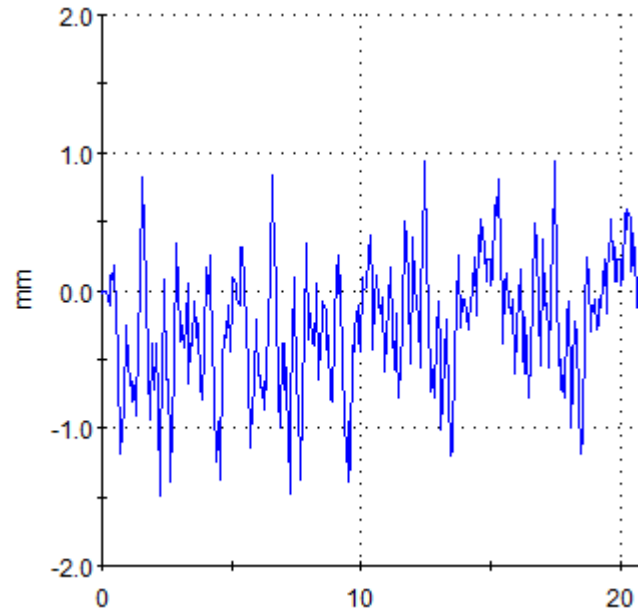
en torno a 2 mm. Por lo tanto, en ambas situaciones el modelo estaría trabajando con unos inputs longitudinales similares.

### 10.2.2.Comparación de la adquisición lateral 1

A continuación, se realiza la comparación de las entradas del actuador lateral 1 en la primera adquisición y en la segunda adquisición.



*Ilustración 74 Entrada del actuador lateral 1 en la primera adquisición, FUENTE: RPC*

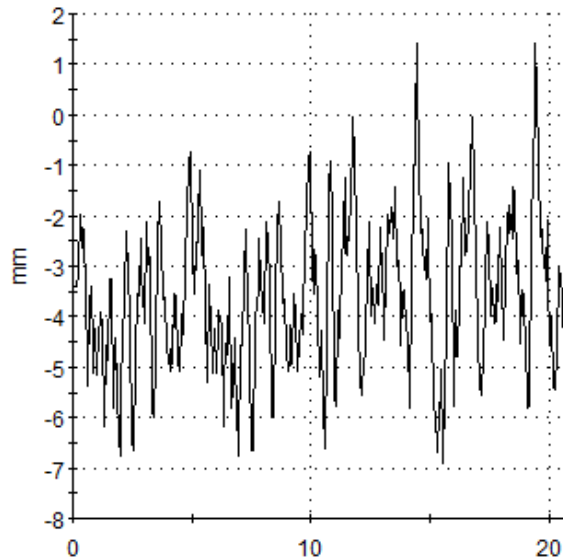


*Ilustración 75 Entrada del actuador lateral 1 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

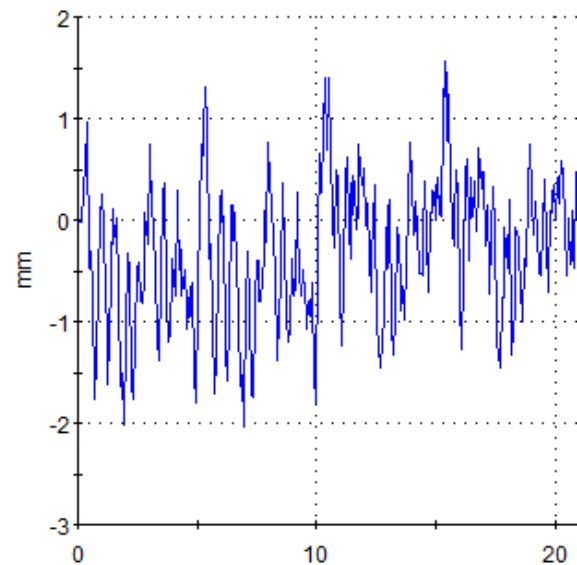
Posteriormente, se procede a comparar los desplazamientos de los actuadores del lateral 1, en el cual se daba uno de los mayores errores tanto de forma como de amplitud que se observaron en la comparación previa de las fuerzas. Comparando los valores de ambas señales, teniendo en cuenta nuevamente el offset de la primera adquisición, se observa que en la primera adquisición las amplitudes están en torno a 5 mm. Sin embargo, en la segunda adquisición los valores de las amplitudes están en torno a 2 mm. Por consiguiente, se aprecia una diferencia notable en el rango de los desplazamientos de ambas adquisiciones. Por lo tanto, el modelo estaría trabajando con unos rangos de inputs del lateral 1 diferentes.

### 10.2.3.Comparación de la adquisición lateral 2

Las entradas de la primera y segunda adquisición del actuador lateral 2 son las siguientes que se comparan.



*Ilustración 77 Entrada del actuador lateral 2 en la primera adquisición, FUENTE: RPC*

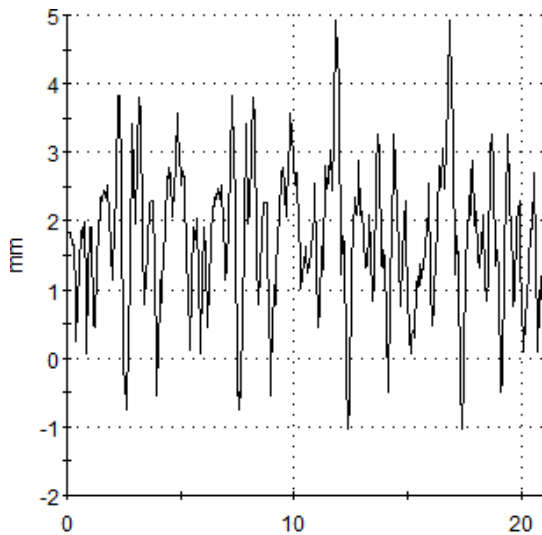


*Ilustración 76 Entrada del actuador lateral 2 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

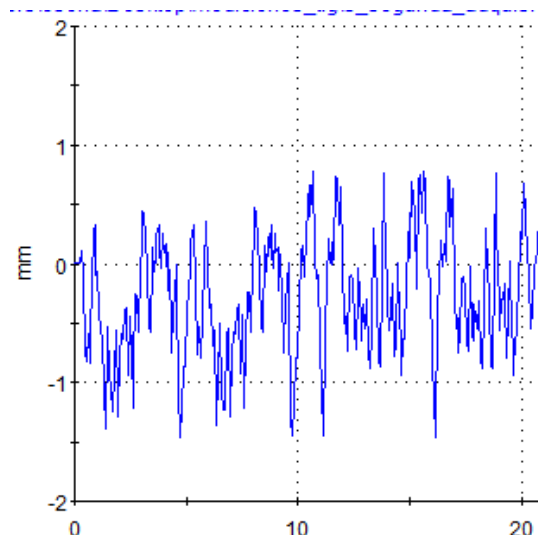
A continuación, se procede a comparar los desplazamientos de los actuadores del lateral 2, en el cual se daba un error notable entre las amplitudes de la señal experimental y la del modelo. Comparando los valores de ambas señales, teniendo en cuenta nuevamente el offset de la primera adquisición, se observa que en la primera adquisición las amplitudes están en torno a 7 mm. Sin embargo, en la segunda adquisición los valores de las amplitudes están en torno a 2.5 mm. Por consiguiente, se aprecia una diferencia notable en el rango de los desplazamientos de ambas adquisiciones. Por ende, el modelo estaría trabajando con unos rangos de inputs del lateral 2 diferentes.

#### 10.2.4.Comparación de la adquisición lateral 3

Seguidamente se realiza la misma comparación, pero para las entradas del actuador lateral 3.



*Ilustración 79 Entrada del actuador lateral 3 en la primera adquisición, FUENTE: RPC*

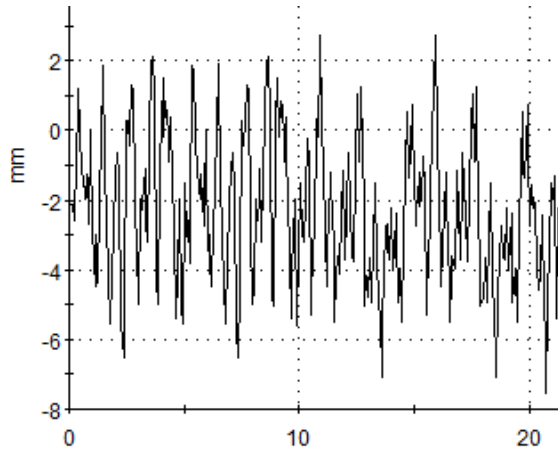


*Ilustración 78 Entrada del actuador lateral 3 en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

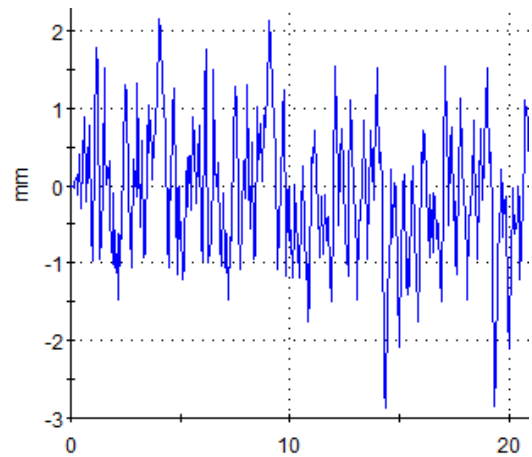
Posteriormente, se procede a comparar los desplazamientos de los actuadores del lateral 3, que al igual en el lateral 1 presentaba errores importantes tanto en la forma como en la amplitud. Comparando los valores de ambas señales, teniendo en cuenta nuevamente el offset de la primera adquisición, se observa que en la primera adquisición las amplitudes están en torno a 4 mm. Sin embargo, en la segunda adquisición los valores de las amplitudes están en torno a 1.5 mm. Por consiguiente, se aprecia una diferencia notable en el rango de los desplazamientos de ambas adquisiciones. De manera que, el modelo estaría trabajando con unos rangos de inputs del lateral 3 diferentes.

### 10.2.5.Comparación de la adquisición brake

A continuación, se hace la comparación de las entradas de la primera y segunda adquisición del actuador de brake.



*Ilustración 81 Entrada del actuador de brake en la primera adquisición, FUENTE: RPC*

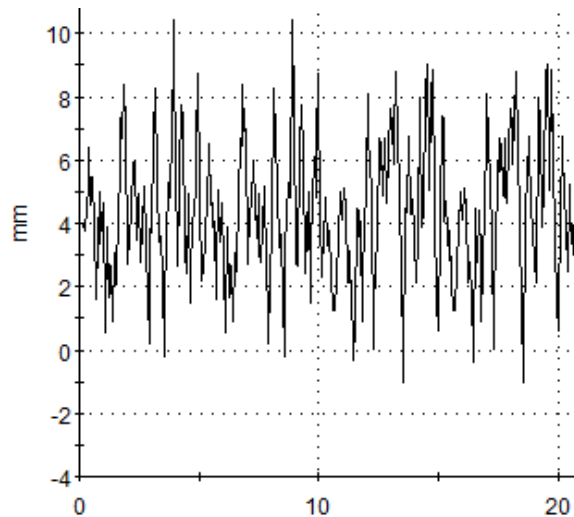


*Ilustración 80 Entrada del actuador de brake en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

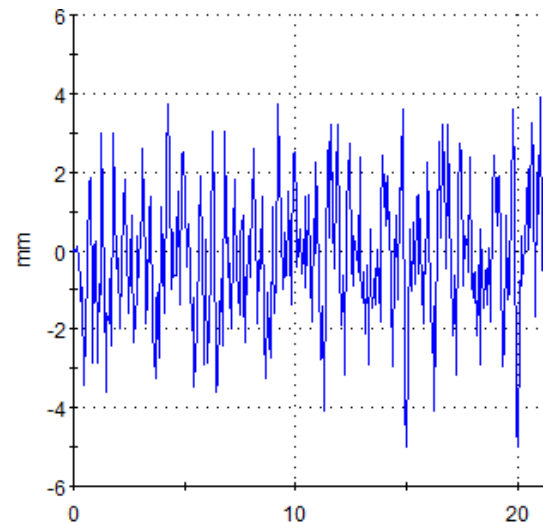
Posteriormente, se procede a comparar los desplazamientos de los actuadores del brake, una de las medidas que mejor se ajustaba a la medición experimental tanto en amplitud como en forma y desfase. Comparando los valores de ambas señales, teniendo en cuenta nuevamente el offset de la primera adquisición, se observa que en la primera adquisición las amplitudes están en torno a 6 mm. Sin embargo, en la segunda adquisición los valores de las amplitudes están en torno a 2.5 mm. Por consiguiente, se aprecia una diferencia notable en el rango de los desplazamientos de ambas adquisiciones. No obstante, a diferencia de lo ocurrido en las mediciones del lateral 1, 2 y 3, esta diferencia no genera un error importante en la medición del modelo. Esto puede deberse a la no existencia de un bushing en la transmisión del movimiento del actuador.

### 10.2.6.Comparación de la adquisición vertical

Por último, se hace la comparación de las entradas de la primera y segunda adquisición del actuador vertical.



*Ilustración 83 Entrada del actuador vertical en la primera adquisición, FUENTE: RPC*



*Ilustración 82 Entrada del actuador vertical en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

Por último, se procede a comparar los desplazamientos de los actuadores del vertical, aunque no se tiene una medición con la cual calibrar directamente las fuerzas generadas por estos desplazamientos, sí que se calibra de manera indirecta con las demás mediciones en las cuales tiene influencia. Teniendo en cuenta esto, se procede a observar los rangos de las amplitudes de ambas señales. En la señal de la primera adquisición se observa que los desplazamientos están en torno a 6 mm, mientras que en la señal de la segunda adquisición están en torno 5 mm. Por consiguiente, al ser una diferencia pequeña se considera que en ambos casos el modelo está trabajando en rangos de inputs verticales similares

#### 10.2.7. Conclusión

Observando los resultados de la comparación realizada entre los desplazamientos de los actuadores junto a la comparación de las mediciones de las fuerzas, se aprecia una relación entre la diferencia de rango de los desplazamientos de los actuadores y las discrepancias entre las mediciones de fuerzas del modelo y las experimentales.

Esta relación es debida a los bushings del modelo, ya que, estos en la realidad no tienen un comportamiento lineal. Por consiguiente, al trabajar ante rangos distintos de desplazamiento, y por ende ante distintos rangos de deformaciones, sus valores de rigidez y amortiguamiento se verán afectados. Como resultado, el modelo no conseguirá simular con éxito el comportamiento del simulador de carreteras.

Una prueba más de esto es la medición del brake, en la cual, a pesar de tener también unos rangos de desplazamiento diferentes en ambas adquisiciones, al no tener un bushing la medición de las fuerzas de brake no se ven tan afectadas. Por el contrario, las mediciones de fuerzas laterales sí se ven afectadas al estar condicionadas por los bushings. Para resolver este problema y poder utilizar el modelo se plantean 2 opciones.

La primera solución que se plantea consiste en modelizar los bushings con el fin de que se comporten de manera no lineal, para ello se desmontaría uno de los bushings para posteriormente ensayarlo y de esta manera obtener una fórmula que reproduzca el comportamiento del este. Sin embargo, esta opción se descarta al no poder mantener el simulador de carreteras fuera de funcionamiento durante tanto tiempo.

La segunda solución que se plantea consiste en realizar varios modelos, cada uno de ellos calibrado para un rango determinado. De esta manera, con varios modelos se tendrían cubiertos todos los rangos de desplazamientos habituales en los ensayos realizados en el simulador de carreteras. Esta es la opción por la cual se decanta.

### 10.3. Ajuste del modelo

#### 10.3.1.Planteamiento

Una vez identificado la causa de la discrepancia entre las mediciones del modelo y las experimentales se procede a ajustar nuevamente el modelo a la nueva adquisición. Para de esta manera poder comprobar, con el modelo una vez ajustado, si los cambios realizados en el modelo han modificado el comportamiento cinemático.

#### 10.3.2.Calibración del modelo

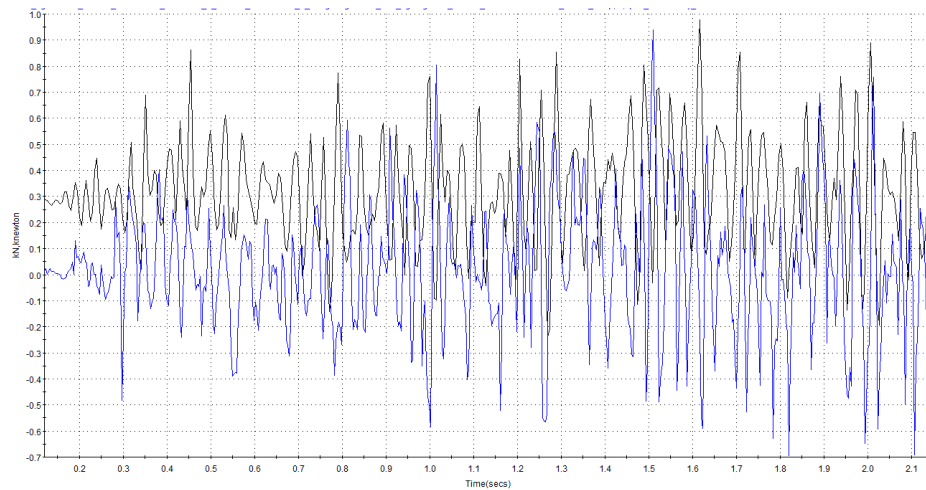
Se procede a realizar una última iteración de los bushings para ajustar las mediciones del modelo a las experimentales. En esta ocasión se empieza ajustando las mediciones que presenten las mayores discrepancias con los resultados reales y posteriormente se ajusta las demás mediciones.

#### 10.3.3.Lateral 1 y Lateral 3

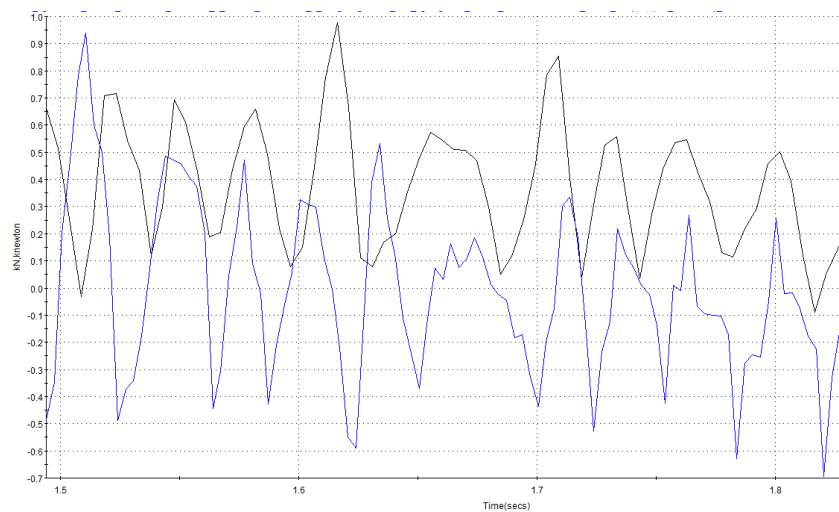
El primer paso que se da es ajustar al mismo tiempo la medición del lateral 1 y del lateral 3 como ya se hizo anteriormente. Esto es debido a la gran influencia que ejerce uno en el otro, ya que, el movimiento de dirección se simula mediante una combinación de movimientos del lateral 1 y del lateral 3. Para ello, nuevamente se iteran los valores de rigidez y amortiguamiento de los componentes Y y Z de los bushings.

A continuación, se procede a analizar los resultados de las mediciones del lateral 1 comparándolo con el resultado experimental. Con el propósito de evaluar la medición se compara la media de las señales, el periodo de un intervalo concreto y la diferencia de las amplitudes de pico a pico de un intervalo.





*Ilustración 84 Comparación de las amplitudes de las fuerzas laterales 1 en la primera iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC*



*Ilustración 85 Comparación del desfase de las fuerzas laterales 1 en la primera iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

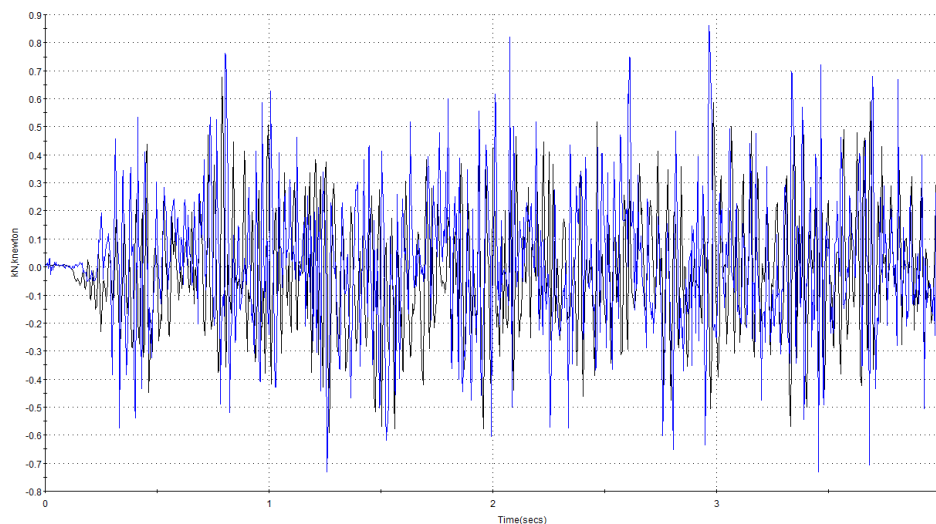
valor medio modelo	0.011 kN
valor medio experimental	0.010 kN
diferencia	0.001 kN

periodo modelo	0.033 s
periodo experimental	0.029 s
diferencia	0.004 s

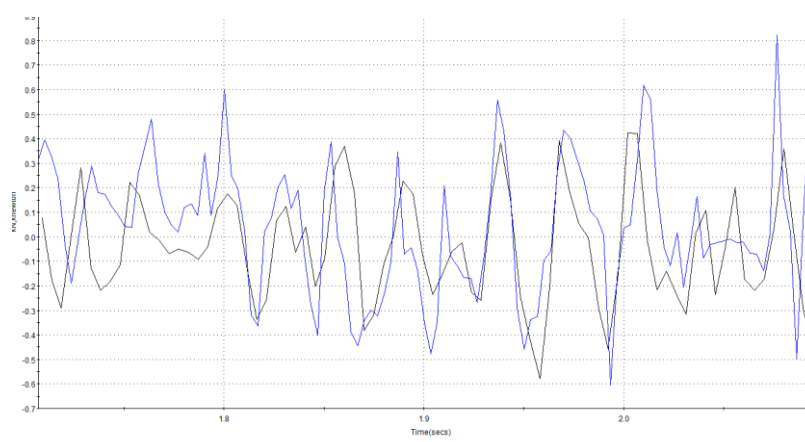
amplitud de pico a pico modelo	0.745 kN	0.423 kN	0.908 kN
amplitud de pico a pico experimental	0.635 kN	0.513 kN	1.084 kN
diferencia	0.111 kN	-0.090 kN	-0.176 kN

Analizando los tres puntos elegidos para realizar la comparación se puede observar una mejora sustancial. Por un lado, se consigue una buena aproximación de las amplitudes teniendo un error relativo en la media en torno al 10 %, aunque como se puede observar en la comparación de la amplitud de pico a pico en un intervalo concreto este error aumenta ligeramente. Por otro lado, se consigue reproducir con mayor exactitud la forma de la señal. Por último, se aprecia un desfase despreciable. Por todo ello, se da por válido el ajuste de la medición del lateral 1.

Una vez validada la medición del lateral 1 se procede a analizar la medición del lateral 3, para comprobar si esta medición también se ajusta a las exigencias establecidas para darla por apta.



*Ilustración 86 Comparación de las amplitudes de las fuerzas laterales 3 en la segunda iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC*



*Ilustración 87 Comparación del desfase de las fuerzas laterales 3 en la segunda iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

valor medio modelo	0.014 kN
valor medio experimental	-0.019 kN
diferencia	0.005 kN

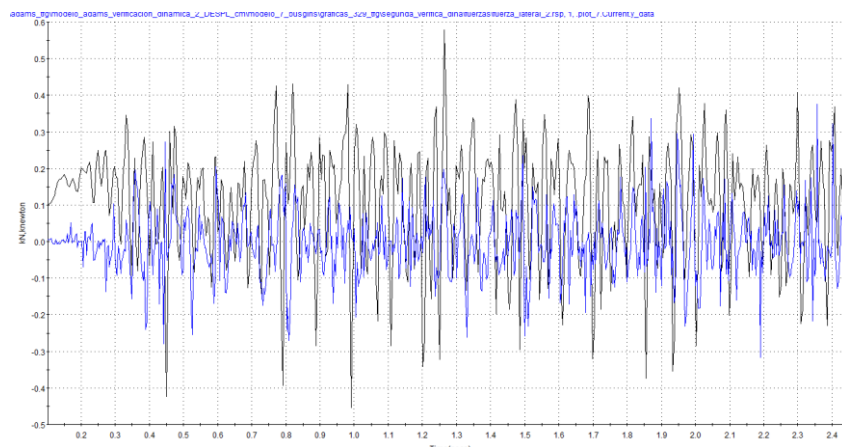
periodo modelo	0.031 s
periodo experimental	0.033 s
diferencia	-0.002 s

amplitud de pico a pico modelo	0.890 kN	1.004 kN	0.764 kN
amplitud de pico a pico experimental	0.960 kN	0.851 kN	0.741 kN
diferencia	-0.071 kN	0.153 kN	0.023 kN

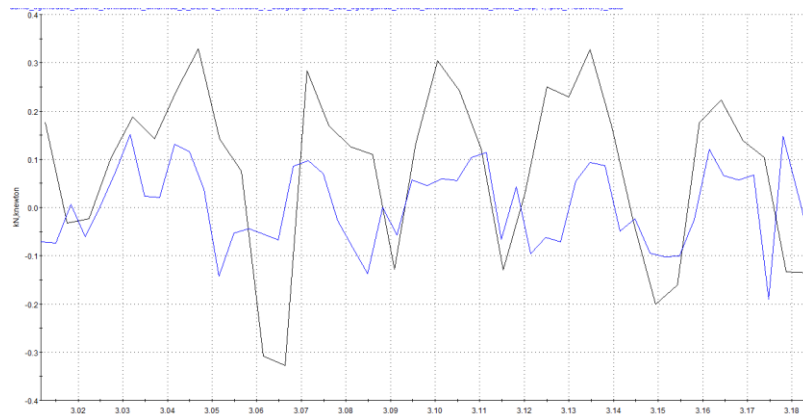
En este caso se observa un error relativo en la media del 26.32%, el cual aun siendo inferior al 40% es mayor que el error cometido en el ajuste del lateral 3 de la primera adquisición, pero al ser un error de 5 N se desprecia. Además, este error no se aprecia en la diferencia entre las amplitudes de pico a pico del intervalo elegido, donde el error relativo medio está en torno al 10 %. Por otro lado, como ocurre en el ajuste del lateral 1, se consigue reproducir con mayor exactitud la forma de la señal. Por último, nuevamente el desfase existente entre ambas señales es despreciable. Por consiguiente, se da por válido el ajuste de la medición del lateral 3, aunque se podría mejorar realizando un calibrado únicamente del bushing del lateral 3.

#### 10.3.4.Lateral 2

La medición del lateral 2 es la siguiente que se ajusta. Del mismo modo que en el ajuste anterior se procede a iterar los componentes de rigidez y amortiguamiento de las direcciones Y y Z de las coordenadas generales del modelo del bushings del lateral 2.



*Ilustración 88 Comparación de las amplitudes de las fuerzas laterales 2 en la tercera iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC*



*Ilustración 89 Comparación del desfase de las fuerzas laterales 2 en la tercera iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

valor medio modelo	0.005 kN
valor medio experimental	0.006 kN
diferencia	0.001 kN

periodo modelo	0.031 s
periodo experimental	0.029 s
diferencia	0.002 s

amplitud de pico a pico modelo	0.730 kN	1.469 kN	1.319 kN
amplitud de pico a pico experimental	1.167 kN	1.893 kN	1.612 kN
diferencia	-0.438 kN	-0.423 kN	-0.293 kN

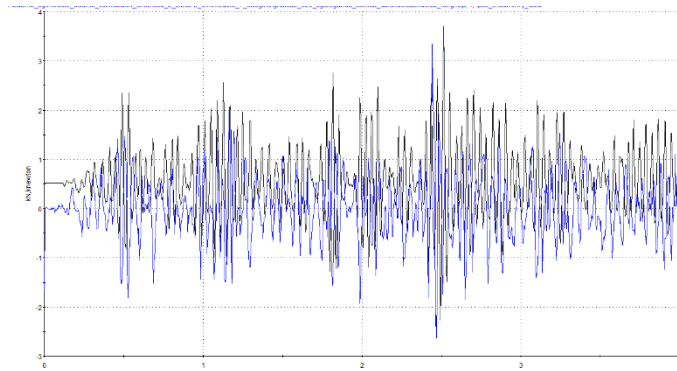
Analizando los resultados, se aprecia un error relativo en la media que está en torno al 17%, el cual está dentro de los márgenes admisibles. Por otra parte, el modelo consigue reproducir la forma con bastante exactitud con desfase despreciable entre ambas señales. Por ende, se da por válido el ajuste de la medición del lateral 2.

### 10.3.5. Longitudinal

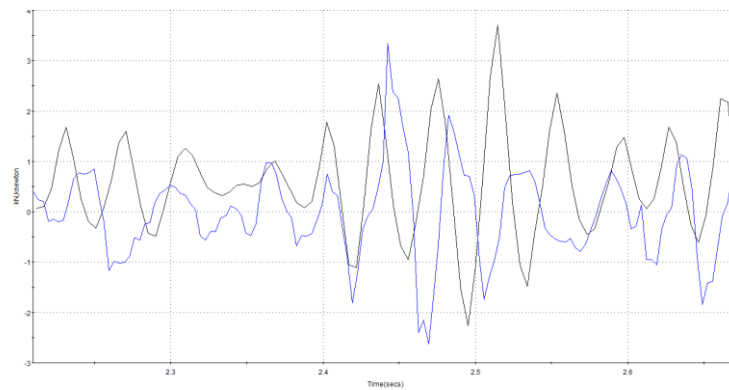
Una vez se tienen todas las mediciones laterales ajustadas se procede a ajustar la medición longitudinal. Ya que, aunque es cierto que en la primera comparación el resultado era satisfactorio con los ajustes realizados puede haber variado la medición del longitudinal. Por consiguiente, se itera la rigidez y amortiguamiento los componentes X de la dirección general de los mismos bushings ajustados en la primera adquisición.

A continuación, se procede a analizar los resultados de la medición longitudinal comparándola con el resultado experimental. Con el propósito de

evaluar la medición se compara la media de las señales, el periodo de un intervalo concreto y la diferencia de las amplitudes de pico a pico de un intervalo.



*Ilustración 90 Comparación de las amplitudes de las fuerzas longitudinales en la cuarta iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC*



*Ilustración 91 Comparación del desfase de las fuerzas longitudinales en la cuarta iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

valor medio modelo	-0.014 kN
valor medio experimental	0.016 kN
diferencia	0.002 kN

periodo modelo	0.034 s
periodo experimental	0.040 s
diferencia	-0.006 s

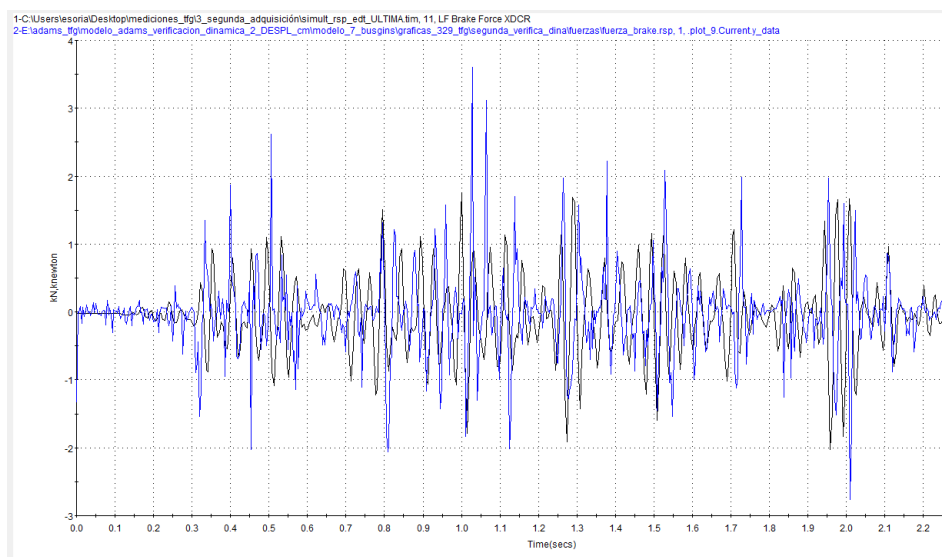
amplitud de pico a pico modelo	1.974 kN	1.871 kN	1.269 kN
amplitud de pico a pico experimental	2.888 kN	1.420 kN	1.507 kN
diferencia	-0.914 kN	0.451 kN	-0.238 kN

Se observa una buena aproximación de las amplitudes con un error relativo en la media que está en torno al 12 %, lo cual confirma la causa del error relativo en la primera verificación. Por otro lado, se aprecia que el modelo consigue reproducir

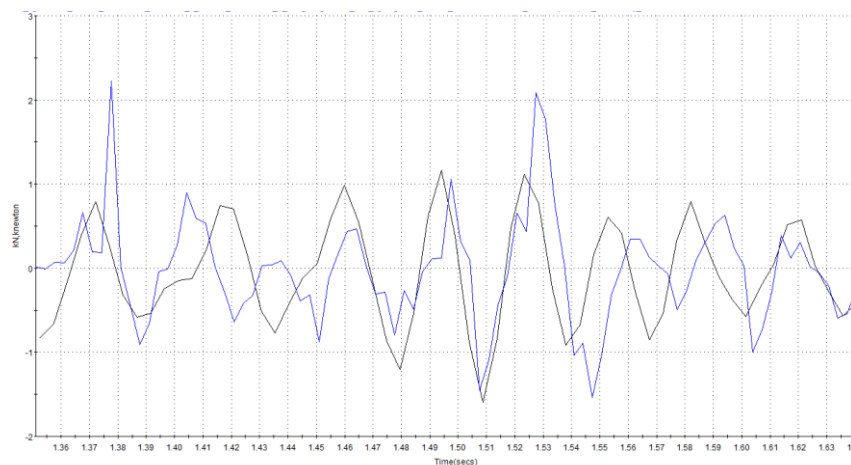
la forma de la señal experimental con un desfase despreciable. Por consiguiente, se da por válido el ajuste realizado de la medición longitudinal.

### 10.3.6.Brake

Por último, se ajusta la medición de brake al ser esta la que menos variaciones genera en las demás mediciones. Para realizar este ajuste se iteran los valores de los coeficientes de rozamiento del contacto entre el reenvío de brake y el cilindro unido al actuador que genera los movimientos de brake, como ya se realizó en los anteriores ajustes.



*Ilustración 92 Comparación de las amplitudes de las fuerzas de brake en la quinta iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC*



*Ilustración 93 Comparación del desfase de las fuerzas de brake en la quinta iteración de la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

valor medio modelo	-0.044 kN
valor medio experimental	-0.054 kN
diferencia	0.010 kN

periodo modelo	0.030 s
periodo experimental	0.029 s
diferencia	0.001 s

amplitud de pico a pico modelo	2.505 kN	1.225 kN	0.816 kN
amplitud de pico a pico experimental	2.754 kN	1.516 kN	1.370 kN
diferencia	-0.249 kN	-0.291 kN	-0.553 kN

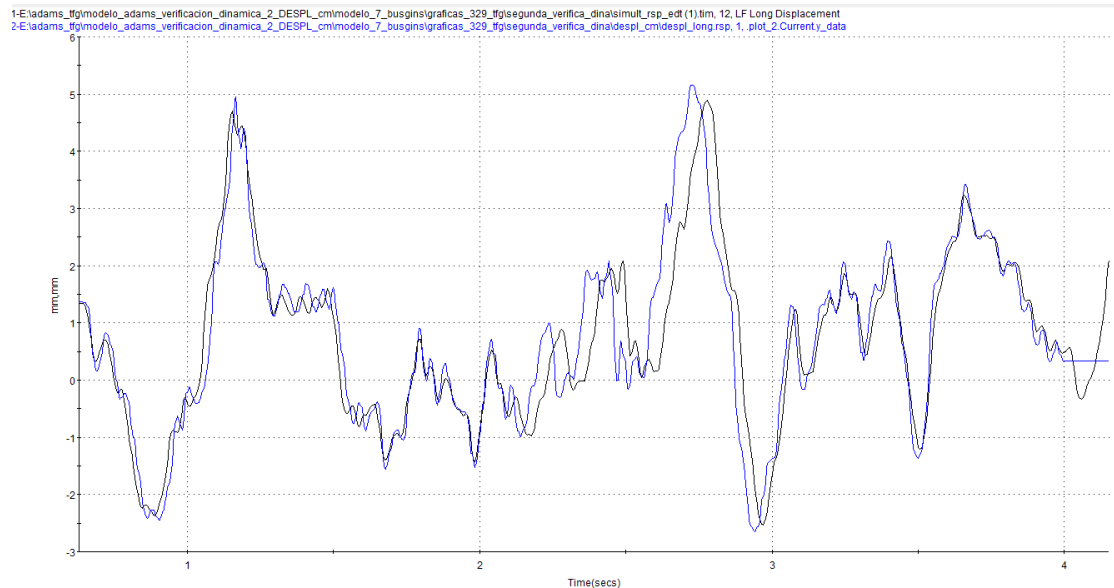
Se obtiene un error relativo en la media que está en torno al 18 %, el cual está dentro de los márgenes admisibles. Asimismo, el modelo consigue reproducir la forma de la señal experimental con un desfase despreciable. Por ende, se da por válido el ajuste realizado de la medición de brake.

## 11. Comprobación geométrica

Una vez ajustado los bushings a la nueva adquisición se procede a realizar nuevamente la verificación cinemática del modelo. Para ello, se realiza la comprobación de los datos de desplazamiento experimentales y del modelo del centro de masa de Swift.

### 11.1. Desplazamiento longitudinal.

En la primera verificación se comprueba el desplazamiento longitudinal del modelo.



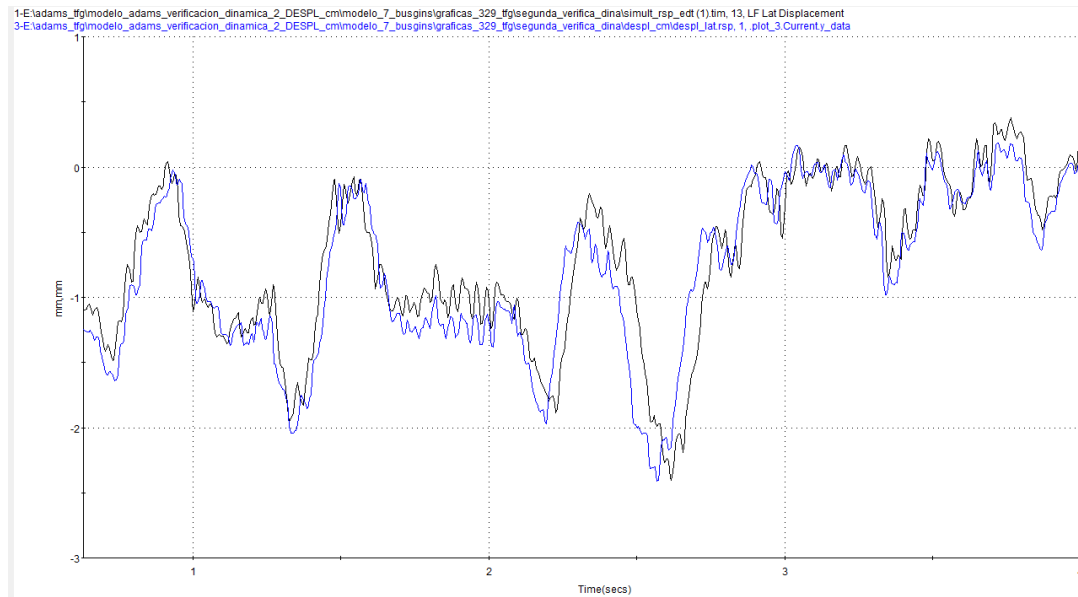
*Ilustración 94 Verificación de los desplazamientos longitudinales del Swift en la segunda adquisición,  
FUENTE: RPC*

Analizando las dos señales del desplazamiento longitudinal se puede comprobar que la diferencia de amplitudes entre ambas señales es mínima. Además, el desfase existente entre ambas señales es despreciable en gran parte del intervalo. Por otro lado, no se da un salto inicial en los desplazamientos como sí ocurría en los desplazamientos longitudinales de la primera verificación cinemática. Aunque los resultados son satisfactorios sigue dándose algunas diferencias entre los desplazamientos experimentales y del modelo, las cuales son debidas a las diferencias geométricas entre el modelo y el simulador al no tener los planos necesarios y adecuados para realizar un modelo exacto del simulador. Estas diferencias, aun siendo mínimas, son las causantes de las discrepancias generadas en las células de carga, ya que, aun siendo mínimas su efecto se amplifica en las fuerzas al tener gran influencia en las aceleraciones.

## 11.2. Desplazamiento lateral.

A continuación, se verifica el desplazamiento lateral del modelo.



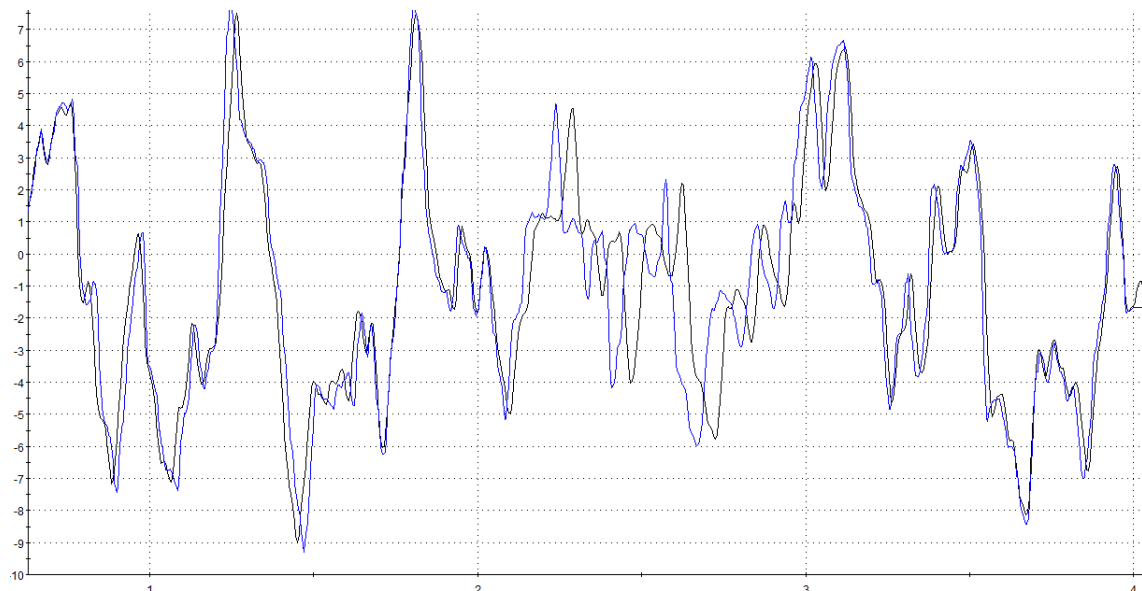


*Ilustración 95 Verificación de los desplazamientos laterales del Swift en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

Analizando las dos señales nuevamente se observan diferencias mínimas entre las amplitudes de ambas señales. Además, como en el caso anterior, el desfase existente entre ambas señales es despreciable en gran parte del intervalo analizado. Por lo tanto, los resultados son satisfactorios.

### 11.3. Desplazamiento vertical

Por último, se verifica el desplazamiento vertical del modelo.



*Ilustración 96 Verificación de los desplazamientos verticales del Swift en la segunda adquisición, FUENTE: RPC*

Una vez más se observa que ambas señales son similares, con una diferencia de amplitud y un desfase despreciable en gran parte del intervalo analizado. Aun

así, y como ocurre en las anteriores verificaciones, también existen pequeñas diferencias en las amplitudes de los desplazamientos, las cuales generan las diferencias entre las fuerzas que ve el modelo y el simulador.

## 12. CONCLUSIÓN

Resultados obtenidos de este proyecto son los siguientes:

-Para empezar, se ha obtenido un modelo rígido con flexibilidad en las uniones del simulador de carreteras que cumple con los objetivos. Si bien es cierto que el modelo realizado no reproduce el comportamiento del simulador para todos los rangos de desplazamiento debido a la falta de tiempo y de medios. Se ha conseguido solventar esta situación calibrando varios modelos para diferentes amplitudes de desplazamiento y tipos de ensayos.

- Por otro lado, también se ha cumplido el objetivo de verificar y actualizar el modelo CAD de los simuladores de carreteras del centro NAITEC.

Por consiguiente, se han cumplido los objetivos establecidos al inicio del proyecto. Por todo ello, los resultados del proyecto han sido satisfactorios y útiles tanto para mí como para NAITEC.

## 13. BIBLIOGRAFÍA

Aficionados a la Mecánica. (2019). Sistema de Dirección. Recuperado de <http://www.aficionadosalamecanica.net/direccion-geometria.htm>

Biblioteca TRDC. (2014). Citas y referencias: recomendaciones y aspectos básicos del estilo APA. En archivos de IWETEL. Recuperado de [http://www2.unavarra.es/gesadj/servicioBiblioteca/tutoriales/Citar\\_referenciar\\_\(APA\).pdf](http://www2.unavarra.es/gesadj/servicioBiblioteca/tutoriales/Citar_referenciar_(APA).pdf)

Coppeliarobotics. (2019). Joint types and operation. Recuperado de <http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/jointDescription.htm>

Kashima UNIVERSITY. (2019). Descripción y eficacia del sistema de frenado. Recuperado de <http://kashima.campuseina.com/mod/book/view.php?id=7679>

MSC Software. (2019). Working with Components. Recuperado de [file:///C:/Program%20Files/MSC.Software/Adams%20Student%20Edition/2019\\_2/help/wwhelp/wwhimpl/js/html/wwhelp.htm#href=adams\\_car/attachments.html#1001688](file:///C:/Program%20Files/MSC.Software/Adams%20Student%20Edition/2019_2/help/wwhelp/wwhimpl/js/html/wwhelp.htm#href=adams_car/attachments.html#1001688)

MTS. (2019). Road Simulation Systems. Recuperado de  
<https://www.mts.com/en/products/producttype/test-systems/simulation-systems/road-simulation/index.htm>